

DOI: 10.18721/JCSTCS.10205

УДК 621.396

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ СИСТЕМЫ ВТОРИЧНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ НА УДАЛЕННОМ ПУНКТЕ КОНТРОЛЯ

И.А. Цикин, Е.С. Поклонская

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрен метод дистанционного контроля систем вторичной радиолокации (ВРЛ) на основе использования удаленного пункта контроля (УПК), на котором осуществляется анализ запросных и ответных сигналов с целью определения местоположения воздушных судов (ВС) и сравнения результатов с работой контролируемых систем. Выявлены источники ошибок, влияющих на точность работы системы дистанционного контроля (СДК), и найден допустимый уровень данных ошибок для обеспечения требуемой точности. Определена степень влияния каждого из рассмотренных видов ошибок на результат работы СДК. Проанализирована статистика случайной ошибки в определении местоположения ВС в СДК. Проведено сравнение точности работы СДК и контролируемых моностатической и бистатической систем ВРЛ для различных расположений ВС относительно УПК и радиолокационного запросчика. Предложены рекомендации по расположению УПК для обеспечения максимально возможной точности работы системы.

Ключевые слова: вторичная радиолокация; обработка сигналов; пункт контроля; радиолокация; определение местоположения.

Ссылка при цитировании: Цикин И.А., Поклонская Е.С. Обработка сигналов системы вторичной радиолокации на удаленном пункте контроля // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2017. Т. 10. № 2. С. 58–74. DOI: 10.18721/JCSTCS.10205

SECONDARY SURVEILLANCE RADAR SIGNALS PROCESSING AT THE REMOTE ANALYSIS STATION

I.A. Tsikin, E.S. Poklonskaya

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

The paper considers a method of remote control for Secondary Surveillance Radar (SSR) systems based on using a Remote Analysis Station (RAS), which analyzes the request and response signals for the purpose of locating aircraft and comparing the results with the performance of the controlled systems. We have identified the sources of the errors that affect the accuracy of the Remote Analysis Station (RAS) and established the level of these errors acceptable for ensuring the required accuracy. The degree of influence that each of the considered types of errors has on the performance of the RAS is determined. The statistics of aircraft position errors by the RAS is explored. The accuracy of the RAS and the controlled monostatic and bisatic SSR for different aircraft position depending on the SSR and receiver positions is compared. The comparison provides recommendations about the RAS location to provide maximum remote control system (RCS) accuracy.

Keywords: secondary surveillance radar; signal processing; remote analysis station; radiolocation; position determination.

Citation: Tsikin I.A., Poklonskaya E.S. Secondary surveillance radar signals processing at the remote analysis station. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunications and Control Systems. 2017, Vol. 10, No. 2, Pp. 58–74. DOI: 10.18721/JCSTCS.10205

Безопасность воздушного движения обеспечивается в значительной степени решением задачи определения местоположения воздушных объектов. Данную задачу решает ряд систем, в частности, системы первичной (ПРЛ) и вторичной (ВРЛ) радиолокации [1, 6], первые из которых являются активными системами с пассивным ответом, а вторые — активными системами с активным ответом. В ответном сигнале, излучаемом транспондером воздушного судна (ВС), содержится информация о номере ВС, его высоте, курсе скорости и т. д. [1], что является преимуществом систем ВРЛ в сравнении с ПРЛ.

Как в моностатических (МВРЛ), так и в бистатических (БВРЛ) системах ВРЛ [1, 4, 5] одним из видов ошибок, возможных в работе, являются «аномальные» внутрисистемные ошибки, проявляющиеся в погрешностях при измерении координат ВС, существенно превышающих таковые, связанные с воздействием аддитивных помех при обработке сигналов («нормальные» ошибки). Одним из методов контроля уровня аномальных ошибок является создание удаленных пунктов приема и обработки сигналов вторичной радиолокации, или удаленных пунктов контроля (УПК). На подобных пунктах в процессе обработки сигналов контролируемой системы ВРЛ, независимо от работы пункта приема (ПП) данной системы, осуществляется определение местоположения ВС [2, 3, 12]. При существенном расхождении значений координат ВС, полученных системой дистанционного контроля (СДК) и контролируемой системой ВРЛ, принимается решение о наличии аномальных внутрисистемных ошибок в последней.

Особенности дистанционного контроля систем МВРЛ и БВРЛ

В реальных условиях на УПК может отсутствовать априорная информация о местоположении и параметрах работы радара

(далее — радиолокационного запросчика, РЛЗ) контролируемой системы. Данная особенность СДК неизбежно оказывает влияние на точность ее работы. Вместе с тем точность определения местоположения ВС данной системой по уровню нормальных ошибок должна быть по крайней мере того же порядка, что и точность работы контролируемой системы ВРЛ. Сама по себе точность определения местоположения ВС в СДК, так же как и в контролируемой системе ВРЛ, описывается статистической случайной ошибкой $\delta R = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2}$, где δx и δy — соответственно ошибки измерения координат x и y проекции ВС на плоскость Земли.

Очевидно, что алгоритм определения местоположения ВС на УПК сводится к алгоритму определения местоположения ВС в эквивалентной системе БВРЛ, однако при условии предварительной оценки местоположения и параметров работы РЛЗ. При этом для вычисления координат ВС необходимо знать значения разности хода $L = R_1 + R_2 - b$ и угла φ (рис. 1), получаемых в результате измерения моментов поступления сигналов РЛЗ и транспондера ВС на вход УПК [4]. Местоположение ВС

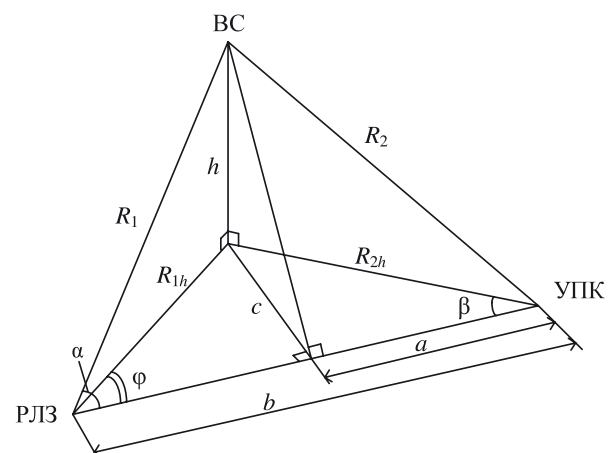


Рис. 1. Схема удаленного контроля системы ВРЛ
Fig. 1. The SSR distance control scheme

вычисляется из известных координат РЛЗ и УПК, а также расстояний R_1 и R_2 , определяемых из измеренных значений L и φ .

Уровень указанных выше ошибок измерения координат ВС в СДК существенно зависит не только от величины ошибок в оценке моментов поступления сигналов на УПК, но также, в общем случае, и от расположения ВС относительно УПК и РЛЗ [1, 4].

Точность работы системы МВРЛ зависит от точности определения моментов поступления сигнала РЛЗ на вход приемника ВС и сигнала транспондера ВС на вход приемного устройства системы МВРЛ. При этом в соответствующей СДК, кроме того, необходимо определять также и момент поступления запросного сигнала РЛЗ, что вносит вклад в итоговую ошибку δR . Помимо этого, на различие в точности работы СДК и контролируемой системы МВРЛ влияет то, что вследствие территориального разнесения приемного устройства и РЛЗ точность работы СДК хотя и остается приблизительно той же при значительном удалении проекции обнаруживаемого ВС на Землю от отрезка, соединяющего УПК и РЛЗ (называемого базой системы), но становится ниже при приближении проекции к данному отрезку. При этом, при расположении проекции обнаруживаемого ВС вблизи линии базы, когда $c \ll b$ (рис. 1), с уменьшением высоты его полета точность работы системы снижается, что обусловлено уменьшением значений величин φ и L и, соответственно, увеличением относительных ошибок $\delta\varphi/\varphi$ и $\delta L/L$ [8].

В связи с тем, что в СДК пункт контроля находится на удалении от РЛЗ, а в системе МВРЛ пункт приема совмещен с РЛЗ, геометрия контролирующей и контролируемой систем подразумевает, что точность СДК окажется не выше точности системы МВРЛ даже в условиях, когда параметры РЛЗ являются априорно известными в СДК. Очевидно, априорная неопределенность в отношении параметров работы и местоположения РЛЗ лишь снизит точность работы системы контроля.

При контроле бистатических систем ВРЛ точность СДК в общем случае может

оказаться как выше, так и ниже точности контролируемой системы в зависимости от расположения обнаруживаемого ВС относительно УПК, ПП и РЛЗ. Например, при нахождении проекции ВС на Землю на линии базы системы БВРЛ, но при значительном удалении от линии базы СДК, точность работы СДК может оказаться выше точности работы контролируемой системы. Однако при наличии априорной неопределенности относительно местоположения и параметров РЛЗ точность работы СДК неизбежно снизится, и может оказаться так, что она ни при каких условиях не окажется выше точности работы контролируемой системы.

Таким образом, представляет интерес сравнение точности работы СДК и контролируемых систем МВРЛ и БВРЛ в условиях наличия априорной неопределенности относительно местоположения и параметров РЛЗ контролируемой системы, а также выявление условий, при которых точность работы СДК оказывается по крайней мере того же порядка, что и точность работы контролируемых систем МВРЛ и БВРЛ.

Алгоритм определения местоположения ВС в СДК

Рассмотрим алгоритм определения местоположения ВС в СДК. Заметим, что данная система может быть отнесена к классу бистатических систем, в связи с чем рассматриваемый алгоритм сводится к алгоритму определения местоположения ВС в системе БВРЛ, но с предварительной оценкой местоположения и параметров работы РЛЗ. Основной процедурой обработки сигналов, предусматриваемой данным алгоритмом, является статистическая оценка моментов поступления запросных и ответных сигналов на вход УПК. На рис. 2 на верхней шкале времени отмечены моменты излучения запросных сигналов t_{zi} РЛЗ и моменты излучения ответных сигналов ВС t_{oi} ($i \geq K$). На нижней шкале времени отмечены моменты поступления запросных сигналов t_{zni} и ответных сигналов t_{oni} ($i \geq K$) на вход УПК.

Интервал следования запросных сигналов в системах ВРЛ выбирается таким об-

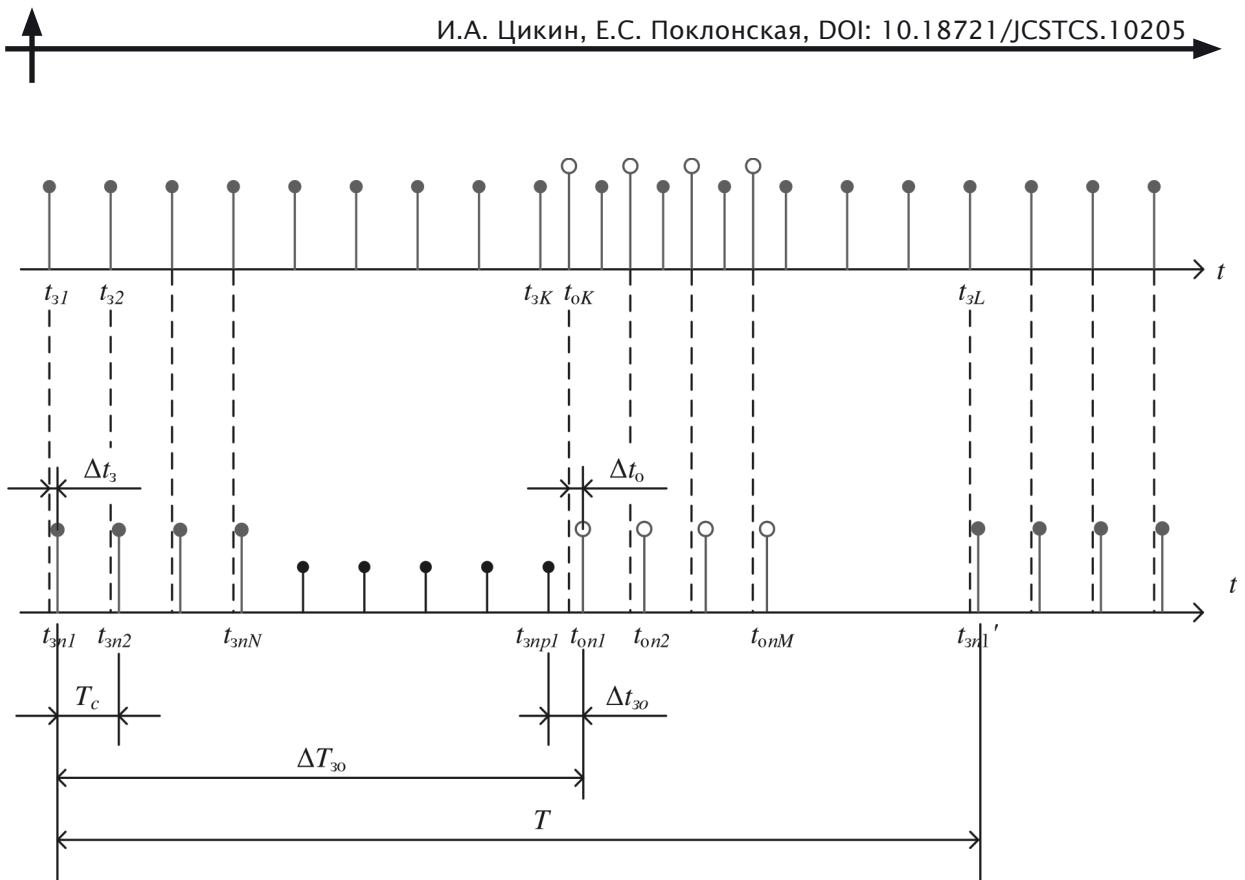


Рис. 2. Моменты излучения (верхняя шкала времени) и приема на УПК (нижняя шкала времени) запросных и ответных сигналов РЛЗ и ВС контролируемой системы ВРЛ

Fig. 2. SSR request and aircraft answer signals time moments of emission (upper time scale) and receiving at RAS (lower time scale)

разом, чтобы он превышал удвоенное время распространения сигнала от РЛЗ до ВС, расположенного на границе зоны видимости РЛЗ. Этим гарантируется, что ответный сигнал от ВС, излученный в момент времени t_{0K} , является ответом на ближайший по времени запросный сигнал, излученный в момент времени t_{3K} .

Рассмотрим, прежде всего, случай, когда период T вращения антенны РЛЗ, период следования запросных сигналов T_c и местоположение РЛЗ являются точно известными. Тогда можно предсказать моменты времени t_{3npi} (короткие отрезки на нижней оси времени на рис. 2), в которые были бы получены очередные запросные сигналы, излучаемые РЛЗ, если бы антенна РЛЗ была всенаправленной, вплоть до моментов времени, в которые поступят ответные сигналы от ВС. В результате можно оценить разницу во времени $\Delta t_{30} = t_{oni} - t_{3npi}$ между принятым i -м ответным сигналом t_{oni} и ближайшим к нему предсказанным

запросным сигналом t_{3npi} . Тогда величина L может быть вычислена по формуле:

$$L = c \cdot (\Delta t_{30} - t_c). \quad (1)$$

Здесь t_c – время обработки запросного сигнала РЛЗ и формирования ответного сигнала ВС, c – скорость света.

Угол φ может быть вычислен по формуле:

$$\varphi = 2\pi \frac{\Delta T_{30}}{T} [\text{рад}]. \quad (2)$$

Таким образом, в СДК ошибки в определении параметров L и φ зависят от ошибок в определении параметров Δt_{30} , ΔT_{30} .

В общем случае, когда значения параметров T и T_c неизвестны, они определяются в процессе обработки запросных и ответных сигналов на основании измеренных моментов их поступления на вход УПК. Вычисление параметра T_c происходит путем усреднения значений предыдущих оцененных интервалов $t_{3ni} - t_{3n(i-1)}$ между мо-

ментами поступления соседних запросных сигналов на вход УПК, а вычисление параметра T – путем усреднения значений интервалов $t_{zn} - t'_{zn}$ между моментами поступления определенных (на рис. 2 – первых в пачке) запросных сигналов. При этом, очевидно, ошибки в определении данных моментов неизбежно повлияют на точность определения местоположения и параметров работы РЛЗ. Так как, согласно формулам (1) и (2), значения разности хода L и угла φ зависят, в частности, от значений T и T_c , неточность в определении моментов поступления сигналов на вход УПК в этом случае внесет дополнительную ошибку в вычисляемые значения параметров L и φ .

Заметим, что сама по себе природа возникновения ошибок при определении L связана с тем, что в результате неверного измерения значения T_c предсказанный момент t_{znpi} излучения запросного сигнала (см. рис. 2) не будет совпадать с моментом времени, в который был бы получен соответствующий запросный сигнал, излучаемый РЛЗ, если бы антенна РЛЗ была всенаправленной.

Кроме ошибок в измерении параметров работы РЛЗ, на точность вычисления L и φ оказывают влияние также «системные» ошибки, связанные с нестабильностями скорости вращения антенны и частоты работы тактового генератора РЛЗ. При этом если уровень ошибок измерения параметров РЛЗ при отсутствии нестабильностей его работы может быть снижен путем увеличения числа измерений, влияние рассмотренных системных ошибок оказывается неустранимым для СДК.

К системным ошибкам также относятся ошибка в определении высоты полета ВС и ошибка, вызванная дискретностью моментов излучения запросных и ответных сигналов. Значение высоты содержится в ответном сигнале, но лишь в указании эшелона высоты, типичная глубина которого составляет 375 м [9]. Таким образом, максимально возможное значение такой ошибки составляет примерно 187,5 м. Дискретный характер следования запросных и ответных сигналов контролируемой системы ВРЛ приводит к ошибочному определению величины ΔT_{30} и, как следствие, к ошибке в

определении угла φ из (2). Последняя, очевидно, не превышает величины $2\pi T_c/T$.

Как отмечалось выше, для определения координат $\{x, y\}$ проекции ВС на плоскость Земли необходимо вычислить значения расстояний R_1 и R_2 (см. рис. 1). Действительно, имеем

$$\begin{cases} (x - x_{\text{РЛЗ}})^2 + (y - y_{\text{РЛЗ}})^2 + (h - z_{\text{РЛЗ}})^2 = R_1^2 \\ (x - x_{\text{УПК}})^2 + (y - y_{\text{УПК}})^2 + (h - z_{\text{УПК}})^2 = R_2^2 \end{cases} \quad (3)$$

где $\{x_{\text{РЛЗ}}, y_{\text{РЛЗ}}, z_{\text{РЛЗ}}\}$ и $\{x_{\text{УПК}}, y_{\text{УПК}}, z_{\text{УПК}}\}$ – пространственные координаты соответственно РЛЗ и УПК.

В свою очередь, значения R_1 и R_2 определяются из следующей системы уравнений на основании параметров L и φ , вычисленных из измеренных моментов поступления запросных и ответных сигналов по формулам (1) и (2):

$$\begin{cases} R_1^2 = h^2 + R_{1h}^2 \\ R_2^2 = h^2 + R_{2h}^2 \\ L = R_1 + R_2 - b \\ R_{2h}^2 = R_{1h}^2 + b - 2R_{1h}b \cos \varphi \end{cases} \quad (4)$$

Здесь известными, в результате проведенных измерений, параметрами являются L, b, h, φ , а неизвестными, соответственно, параметры R_1, R_2, R_{1h}, R_{2h} . Таким образом, в результате решения данной системы уравнений относительно R_1 получается следующее квадратное уравнение:

$$\begin{aligned} R_1^2 [4b^2 \cos^2 \varphi - 4(L + b)^2] + \\ + 4R_1 [(L + b)(L^2 + 2Lb)] - \\ - [4b^2 \cos^2 \varphi h^2 - (L^2 + 2bL)^2] = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

При выполнении условия $|\alpha - \varphi| \ll \alpha, \varphi$ (см. рис. 1), что эквивалентно условию $c \gg h$, вместо квадратного уравнения (5) для определения значения величины R_1 с некоторыми допущениями можно использовать следующую формулу [4]:

$$\begin{aligned} R_1' \approx R_{1h} &= \frac{L_h^2 + 2L_h b}{2L_h + 2b - 2b \cos \varphi} \approx \\ &\approx \frac{L^2 + 2Lb}{2L + 2b - 2b \cos \varphi}. \end{aligned} \quad (6)$$

Однако в общем случае такое допущение приводит к ошибкам, существенным при

некоторых положениях ВС относительно УПК и РЛЗ. В подобных случаях величина R_1 может быть найдена только из квадратного уравнения (5), причем выбор требуемого решения возможен путем сравнения результатов решения уравнений (5) и (6). Для большинства возможных положений ВС относительно УПК и РЛЗ истинным значением R_1 окажется то, для которого величина $|R_1 - R_1'|$ окажется меньше.

Из третьего уравнения системы (4) при известных параметрах L и b и найденном параметре R_1 можно получить значение R_2 , откуда в дальнейшем при известной высоте h воздушного судна определяются его координаты.

Модели обработки сигналов в СДК

С целью анализа точности работы СДК и сравнения ее с точностью контролируемой системы ВРЛ было проведено моделирование работы данных систем в среде Matlab. При этом возможны по меньшей мере два принципиально различных способа построения модели. При первом способе прежде всего находятся распределения статистических оценок моментов поступления запросных и ответных сигналов на вход УПК. Далее производится генерирование случайных величин, имеющих указанные выше распределения, и передача их на вход следующего блока модели, в котором осуществляется нахождение распределений статистических оценок значений параметров L и φ . Это позволяет произвести генерирование таких значений и передачу их, в свою очередь, на блок нахождения распределений статистических оценок значений параметров R_1 и R_2 . Полученные распределения, аналогично предыдущим этапам моделирования, используются для получения распределений оценок значений координат ВС, что, в конечном счете, позволяет получить распределение итоговой ошибки δR .

В отличие от рассмотренного, при втором способе полученные оценки моментов поступления запросных и ответных сигналов на вход УПК не используются для построения функций распределения соответствующих случайных величин, а непосредственно поступают на блок вычисле-

ния оценок значений параметров L и φ , а далее и параметров R_1 и R_2 , позволяющих вычислить оценки значений координат ВС, а следовательно, и величину ошибки δR . Далее, методом статистических испытаний находятся параметры распределения ошибки δR , а при необходимости, и само это распределение.

Недостатком первого способа является трудоемкость построения модели, вызванная необходимостью поиска распределения вероятностей для каждой рассматриваемой случайной величины, что подразумевает построение гистограмм и их соответствующую аппроксимацию. Второй способ лишен данного недостатка, но, в отличие от первого, в общем случае требует больших вычислительных затрат. Это вызвано тем, что для получения статистики ошибки δR в различных условиях при первом способе построения модели достаточно, задав требуемые параметры распределений, запустить только необходимые блоки модели, в то время как при втором способе при каждом испытании используются все блоки модели, представляющей собой в этом случае по сути имитационную модель СДК.

Компромиссным решением является комбинированный способ построения модели, при котором находятся распределения не всех случайных величин, а только части из них. Затем найденные распределения используются при работе следующих блоков модели, в которых вычисление оценок значений прочих параметров производится в соответствии со вторым способом. Далее будет использован именно такой комбинированный способ, в котором изначально находятся распределения случайных моментов поступления запросных и ответных сигналов, а затем с помощью найденных распределений осуществляется оценка значений параметров L и φ , R_1 и R_2 и параметры распределения итоговой ошибки δR . Схема алгоритма работы модели изображена на рис. 3.

Исследуемые области значений параметров распределений моделируемых случайных величин задавались следующим образом. Поскольку в системах ВРЛ ошибки могут достигать нескольких сотен

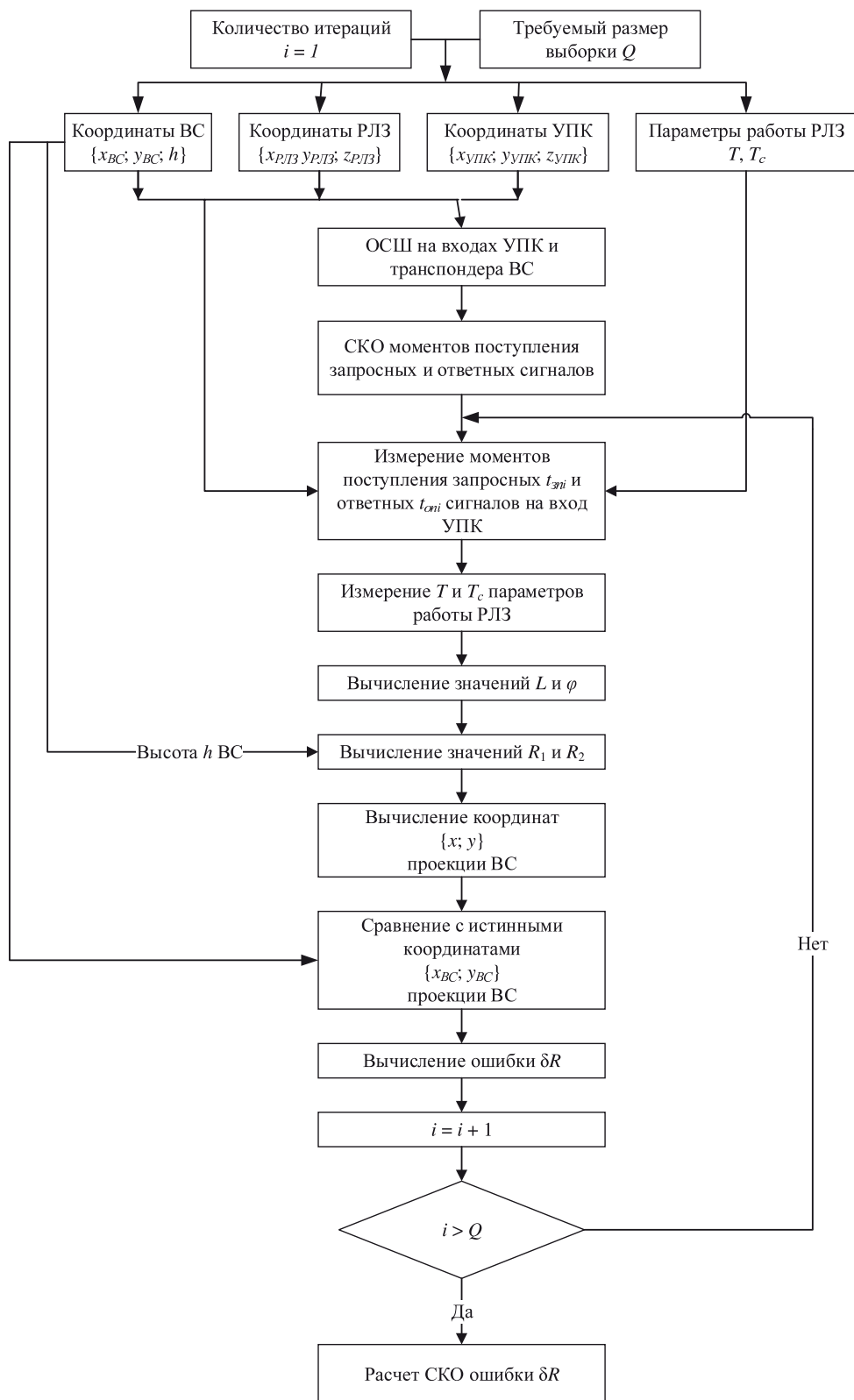


Рис. 3. Схема алгоритма определения параметров распределения ошибки δR
Fig. 3. The algorithm for determining the distribution parameters of the error

метров [10], а ошибки в СДК должны быть того же порядка, что и в контролируемой системе, допустимым среднеквадратичным отклонением (СКО) ошибки в определении местоположения ВС на УПК положим величину, примерно равную 100 м. При этом, поскольку ошибки δR для большинства возможных положений ВС имеют тот же порядок, что и ошибки δL в измерении значения параметра L , будем полагать значение величины $\sigma_{\delta L}$ СКО ошибки δL в определении разности хода также равным примерно 100 м.

Ошибки δt_3 и δt_0 в определении соответственно моментов поступления запросных и ответных сигналов приводят к ошибке в определении значения разности хода $\delta L = (\delta \Delta t_{30})C = (\delta t_0 + \delta t_3 + K_{Tc} \delta T_{c_{\text{выч}}})C$, где $\delta T_{c_{\text{выч}}}$ – ошибка в вычислении значения T_c , вызванная наличием ошибок δt_3 , K_{Tc} – количество предсказанных запросных сигналов. При этом значение T_c вычисляется путем усреднения K_{Tc} результатов измерений величины T_c , равной разнице между моментами t_{3ni} и $t_{3n(i+1)}$ поступления двух соседних запросных сигналов, так что

$\delta T_{c_{\text{выч}}} = \frac{1}{K_{Tc}} \sum_{i=1}^{K_{Tc}} \delta t_{3i}$, где δt_{3i} – ошибка в определении момента поступления i -го запросного сигнала. В связи с этим дисперсия $\sigma_{\delta L}^2$ величины δL определяется суммой дисперсий $\left(\frac{K_{Tc}^2}{K_{Tc}} + 1\right) \sigma_{\delta t_3}^2$ и $\sigma_{\delta t_0}^2$. Величина K_{Tc} равна произведению количества N оборотов антенны, за которые определяются параметры работы РЛЗ, на количество M полученных на УПК запросных сигналов РЛЗ за время, в течение которого антенна РЛЗ была направлена на УПК. Примем $M \approx N \approx 10$. Тогда, полагая $\sigma_{\delta L} \approx 100$ м и $K_{Tc} \approx 10^3$, в условиях $\sigma_{\delta t_3} \approx \sigma_{\delta t_0}$ получаем $\sigma_{\delta t_0} \approx \sigma_{\delta t_3} \approx 10^{-8}$ с.

Полученные значения СКО моментов поступления запросных и ответных сигналов на вход УПК будут использованы ниже при моделировании работы систем ВРЛ и дистанционного контроля в условиях воздействия аддитивного белого гауссова шума.

Учет влияния нестабильностей параметров РЛЗ

Нестабильность работы тактового генератора РЛЗ может иметь как долговременный (когда значения T_c в пределах нескольких оборотов антенны можно считать постоянными), так и кратковременный случайный характер. В последнем случае разности между значениями соседних интервалов T_c (рис. 2) оказываются различными и случайными. При долговременной нестабильности существует возможность слежения за медленно изменяющимися значениями T_c , так что больший вклад в ошибку в определении местоположения ВС из упомянутых «системных» нестабильностей вносят случайные кратковременные нестабильности. Ошибки, связанные с такого рода нестабильностью работы РЛЗ, приводят к росту погрешности δt_{3npi} в предсказании i -го момента излучения запросных сигналов, вносящей, в свою очередь, вклад в результирующую ошибку $\delta \Delta t_{30}$ в вычислении разностей во времени между ответными сигналами и ближайшими к ним предсказанными сигналами (короткие отрезки на рис. 2). Данные ошибки приводят к погрешности в измерении разности хода $\delta L = C \delta \Delta t_{30}$.

Прежде всего оценим уровень величины $\sigma_{\delta T_c}$ СКО ошибки δT_c в определении момента поступления запросного сигнала РЛЗ на УПК, непосредственно предшествующего моменту поступления ответного сигнала от ВС, в условиях отсутствия влияния других видов погрешностей. В данном случае $\delta \Delta t_{30} = \sum_{i=1}^K \delta T_{ci}$, где δT_{ci} – ошибка в определении момента поступления запросного сигнала РЛЗ на i -м цикле предсказания значения этого момента. Значение величины K не превышает количество излучаемых запросных сигналов за период вращения антенны, равное T/T_c . Таким образом, $\sigma_{\delta T_{ci}} \approx \sigma_{\Delta t_{30}} \sqrt{T_c/T}$. Так, в типичных случаях $T_c/T = 10^{-3}$ и $T_c/T = 10^{-4}$, а также по-прежнему ориентируясь на уровень ошибки $\sigma_{\delta L} \approx 100$ м, имеем, соответственно, $\sigma_{\delta T_{ci}} \approx 10^{-8}$ с и $\sigma_{\delta T_{ci}} \approx 10^{-9}$ с. Подобные

значения $\sigma_{\delta T_{ci}}$, как правило, достигаются в аэродромных системах БВРЛ.

В общем же случае, разумеется, на уровень суммарной ошибки $\delta \Delta t_{30}$ влияют также и рассмотренные выше ошибки δt_3 и δt_0 в определении моментов поступления запросных и ответных сигналов на вход УПК, обусловленные влиянием аддитивного шума на входах устройств обработки сигналов.

Нестабильность δT периода вращения антенны РЛЗ приводит к ошибке $\delta \varphi$ в определении угла φ , равной $\delta \varphi = 2\pi \Delta T_{30} / \delta T$. Тогда ошибка в определении координат $\{x; y\}$ ВС в условиях отсутствия другого вида погрешностей измерений будет, очевидно, равна $\delta R = R_{1h} \sqrt{2(1 - \cos \delta \varphi)}$.

Типичными значениями величины R_{1h} являются десятки километров. Таким образом, для обеспечения точности в определении местоположения ВС $\delta R \approx 100$ м можно полагать допустимой ошибку $\delta \varphi \approx \arccos(1 - 10^{-4}/2) = 0,01$ рад.

При моделировании нестабильность δv скорости вращения антенны РЛЗ, соответствующая величине $\delta T = 1/\delta v$ нестабильности периода ее вращения, учитывается в виде случайной ошибки δv_i , вносимой при каждом i -м моменте излучения очередного запросного сигнала. Между моментами излучения соседних запросных сигналов антенна РЛЗ поворачивается на угол $\varphi_i = 2\pi T_c v_i$, где $v_i = \delta v_i + 1/T$ — скорость вращения антенны РЛЗ в рассматриваемый отрезок времени между излучениями i -го и $(i+1)$ -го запросных сигналов.

Полагая $\delta \varphi = \sum_{i=1}^K \delta \varphi_i$, СКО $\sigma_{\delta \varphi_i}$ ошибки $\delta \varphi_i$ будет равно $\sigma_{\delta \varphi_i} = \sigma_{\delta v_i} / \sqrt{K}$ и для $K \approx 10^3$ оказывается порядка 10^{-4} рад. Тогда СКО $\sigma_{\delta v_i} = \sigma_{\delta \varphi_i} / (2\pi T_c)$ нестабильности δv_i скорости вращения антенны РЛЗ в типичном случае $T_c \approx 1$ мс составит величину порядка 0,01 об/с. Данное значение является типичным для аэродромных систем ВРЛ [18].

Полученные значения СКО $\sigma_{\delta T_{ci}}$ и $\sigma_{\delta v_i}$ будут использованы ниже при моделировании систем ВРЛ и дистанционного контроля при наличии нестабильностей скорости вращения антенны и частоты тактового генератора РЛЗ.

Результаты моделирования

Прежде всего, оценим влияние каждого из рассматриваемых видов ошибок на точность работы СДК.

В таблице в качестве примера представлены значения СКО $\sigma_{\delta R}$ ошибки δR и коэффициенты корреляции r между величинами δx и δy при анализе влияния различных (изолированных от других) типов ошибок для случая $R_{2h} = 50$ км, $b = 30$ км, $h = 10$ км (рис. 2). При этом, согласно проведенному моделированию, оцененное ранее значение $\sigma_{\delta t_3} \approx 10^{-8}$ с соответствует отношению сигнал/шум на выходе устройства обработки, примерно равному 10 дБ.

Как следует из результатов, приведенных в таблице, при наличии лишь ошибки в определении высоты полета ВС, СКО $\sigma_{\delta R}$ ошибки в определении его местоположения составляет порядка 10 м. Аналогично, при наличии только ошибки, вызванной дискретным характером излучения запросных и ответных сигналов, $\sigma_{\delta R}$ оказывается также порядка 10 м. Данные ошибки оказывают существенно меньшее влияние на точность работы СДК по сравнению с прочими рассмотренными видами ошибок, поскольку СКО $\sigma_{\delta R}$ с учетом всех видов ошибок достигает величины порядка 100 м. При этом наибольший вклад в равной степени вносят ошибки, связанные с аддитивным шумом, и ошибки, вызванные нестабильностью периода следования запросных сообщений.

Также из таблицы видно, что ошибки в определении координат $\{x; y\}$ коррелированы, и коэффициент корреляции уменьшается лишь при некоторых взаимных положениях РЛЗ, ВС и УПК, причем, в рассматриваемых условиях, только в том случае, когда единственной вносимой ошибкой является ошибка в скорости вращения антенны РЛЗ либо системные ошибки, вызванные эшелонированием высоты или дискретностью запросных и ответных сигналов. Это наглядно видно из рис. 4, на котором в качестве примера представлены истинные и измеренные положения ВС при наличии только ошибки, связанной с эшелонированием (рис. 4 а), при на-

Зависимость СКО δR и коэффициента корреляции r между δx и δy от типа ошибкиThe dependence of standard deviation δR and correlation coefficient r between δx and δy from the error type

Тип ошибки		$\varphi = 70^\circ$		$\varphi = 120^\circ$	
		$\sigma_{\delta R}, \text{М}$	r	$\sigma_{\delta R}, \text{М}$	r
Системные ошибки	Ошибки, связанные с эшелонированием высоты ВС	3,57	-0,03	8,58	-1,00
	Ошибки, вызванные дискретностью излучения запросных и ответных сигналов	3,17	-0,03	10,92	-1,00
	Ошибки, вызванные нестабильностью периода следования запросных сигналов ($\sigma_{\delta T_{ci}} = 5 \cdot 10^{-9}$)	110,37	-0,99	181,09	0,99
	Ошибки, вызванные нестабильностью скорости вращения антенны РЛЗ ($\sigma_{\delta \omega_i} = 10^{-2}$)	79,27	-0,09	79,93	0,99
Ошибки, связанные с влиянием аддитивного шума ($\sigma_{\delta t_0} \approx \sigma_{\delta t_3} \approx 10^{-8}$ с)		160,06	-0,99	256,28	0,99

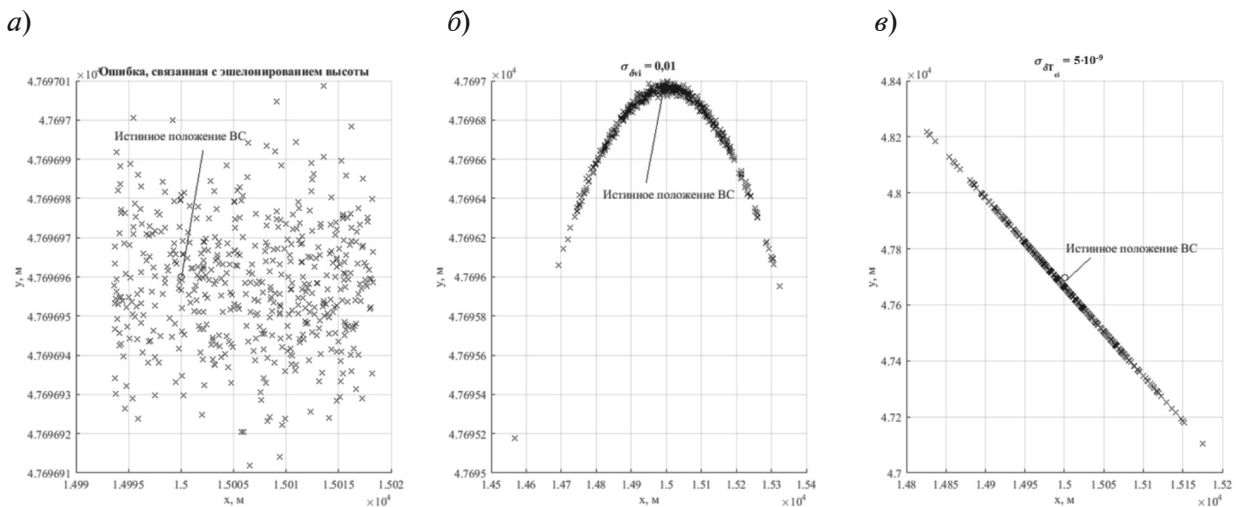


Рис. 4. Значения координат $\{x; y\}$ при наличии только ошибки, связанной с эшелонированием (а), только нестабильности в скорости вращения антенны РЛЗ $\sigma_{\delta \omega_i} = 10^{-3}$ (б) и только нестабильности в периоде следования запросных сигналов $\sigma_{\delta T_{ci}} = 5 \cdot 10^{-9}$ (в) для $\varphi = 70^\circ$

Fig. 4. The coordinate values $\{x; y\}$ in cases of the presence of the error caused by flight level only (a), the SSR antenna instability $\sigma_{\delta \omega_i} = 10^{-3}$ presence only (b) and the request signals pulse repetition interval instability $\sigma_{\delta T_{ci}} = 5 \cdot 10^{-9}$ presence only (c) when $\varphi = 70^\circ$

личии только нестабильности в скорости вращения антенны РЛЗ (рис. 4 б) и при наличии только нестабильности в периоде следования запросных сигналов (рис. 4 в) в частном случае $\varphi = 70^\circ$. Существенно нелинейный характер зависимости ошибки по x -координате от ошибки по y -координате (рис. 4 б) объясняет близкое к нулю значение коэффициента корреляции.

Оценим совместное влияние всех видов рассмотренных ошибок на величину $\sigma_{\delta R}$ СКО ошибки в определении местоположения ВС в представляющем практический интерес случае $L = 100$ км, $b = 30$ км. В качестве примера рассмотрим случаи $\varphi = 72^\circ$ и $\varphi = 120^\circ$. Для сравнения также рассмотрим отдельно случай $L = 50$, $\varphi = 72^\circ$ при прочих равных условиях. Гистограммы, полученные в ходе 5000 статистических испытаний, для каждого из рассмотренных случаев представлены на рис. 5.

Вид функции, аппроксимирующей распределение случайной величины δR , зависит от распределений величин δx и δy . Как показывает моделирование, коэффициент корреляции данных величин в общем случае отличен от нуля, а их распределения в рассматриваемых условиях аппроксимируются нормальными распределениями с нулевыми математическими ожиданиями, но, в общем случае, различными дисперсиями. Тогда распределение случайной величины δR может быть аппроксимировано четырехпараметрическим распределением при равенстве нулю математических ожиданий составляющих (распределением Хойта [11]):

$$W(r) = \frac{r}{\sigma_x \sigma_y} \exp \left[-\frac{r^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_x^2} + \frac{1}{\sigma_y^2} \right) \right] \times I_0 \left[\frac{r^2}{4} \left(\frac{1}{\sigma_x^2} - \frac{1}{\sigma_y^2} \right) \right]. \quad (7)$$

Кроме того, согласно [7], четырехпараметрическое распределение может также с некоторой погрешностью быть аппроксимировано распределением Накагами. Аппроксимации распределениями Хойта и Накагами для различных случаев представлены на рис. 5. При этом в ходе моделирования были получены значения коэффици-

ентов корреляции r , равные $-0,6$ (рис. 4 а), $0,88$ (рис. 4 б) и $-0,95$ (рис. 4 в). Из рисунков видно, что, действительно, распределение Накагами несколько хуже описывает распределение величины δR по сравнению с распределением Хойта. Однако распределение Хойта тем более удовлетворительно аппроксимирует гистограммы распределений δR , чем меньше по модулю значение коэффициента корреляции r . Тем не менее, как показал анализ, при $|r| \approx 1$ рассмотренные аппроксимации распределениями как Хойта, так и Накагами в области малых значений δR имеют существенные погрешности. В то же время, аналитические оценки СКО величины δR , полученные с помощью данных распределений, существенно отличаются от СКО, полученных непосредственно на основе анализа гистограмм распределения величины δR .

Ошибки в определении координат в любой бистатической системе неразрывно связаны с геометрией данной системы. Так как СДК может быть отнесена к разряду бистатических систем, необходимо рассмотреть ошибки в системе контроля для различных положений ВС относительно УПК и РЛЗ, определяющих значения параметров L и φ . Однако рост значения L при фиксированном значении угла φ приводит к увеличению расстояния от ВС до УПК и РЛЗ и соответственно, ослаблению мощности ответного сигнала обратно пропорционально квадрату данного расстояния, что, в свою очередь, вызывает предсказуемое снижение точности работы СДК. Поэтому более интересным является рассмотрение зависимости величины ошибки δR от угла φ . В связи с этим в модели рассматриваются положения ВС на эллипсе с фокусами в местах расположения РЛЗ и УПК, что обеспечивает фиксированную разность хода L при различных значениях угла γ и соответственно, φ (рис. 6).

Рассмотрим различие в точности работы СДК и контролируемых систем ВРЛ (БВРЛ и МВРЛ) для различных значений угла γ . Как отмечалось выше, на точность работы системы МВРЛ влияют только ошибки в определении моментов поступления запросного сигнала на вход ВС и

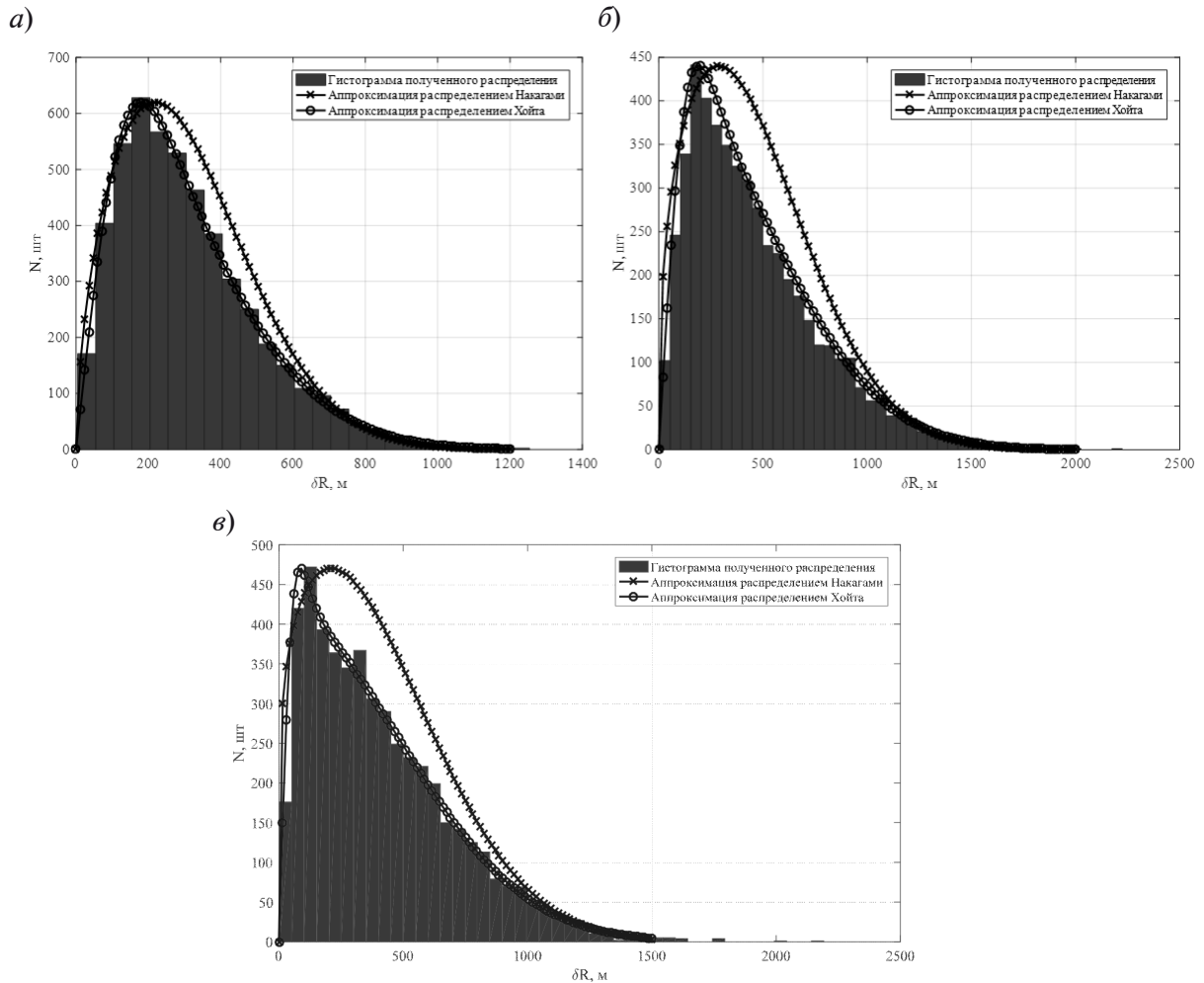


Рис. 5. Гистограммы распределения случайной величины δR и его аппроксимации распределениями Накагами и Хойта для случаев $L = 100$ км, $b = 30$ км, $\varphi = 72^\circ$ (а); $L = 100$ км, $b = 300$ км, $\varphi = 120^\circ$ (б); $L = 50$ км, $b = 30$ км, $\varphi = 72^\circ$ (в)

Fig. 5. The histograms of random variable δR distribution and its approximations by Nakagami and Hoyt distributions in cases of $L = 100$ km, $b = 30$ km, $\varphi = 72^\circ$ (a); $L = 100$ km, $b = 300$ km, $\varphi = 120^\circ$ (b); $L = 50$ km, $b = 30$ km, $\varphi = 72^\circ$ (c)

ответного сигнала на вход РЛЗ, в то время как на точность работы системы БВРЛ также оказывает влияние ошибка в определении момента поступления запросного сигнала от РЛЗ на вход ПП. Нестабильности параметров работы РЛЗ в общем случае также могут сказываться на точности работы БВРЛ, однако в контролируемой системе сами параметры работы РЛЗ априори известны, в то время как в СДК они измеряются в процессе ее работы. Очевидно, при наличии в РЛЗ неста-

бильности в скорости вращения антенны и нестабильности в работе тактового генератора, несмотря на априорные сведения о значениях данных параметров, в системе БВРЛ также неизбежны ошибки. Тем не менее, в отличие от СДК, в данном случае существует возможность организации дополнительного канала связи между ПП БВРЛ и РЛЗ, по которому передаются временные метки, соответствующие моментам излучения запросных сигналов. Кроме того, при наличии в РЛЗ дополнительной

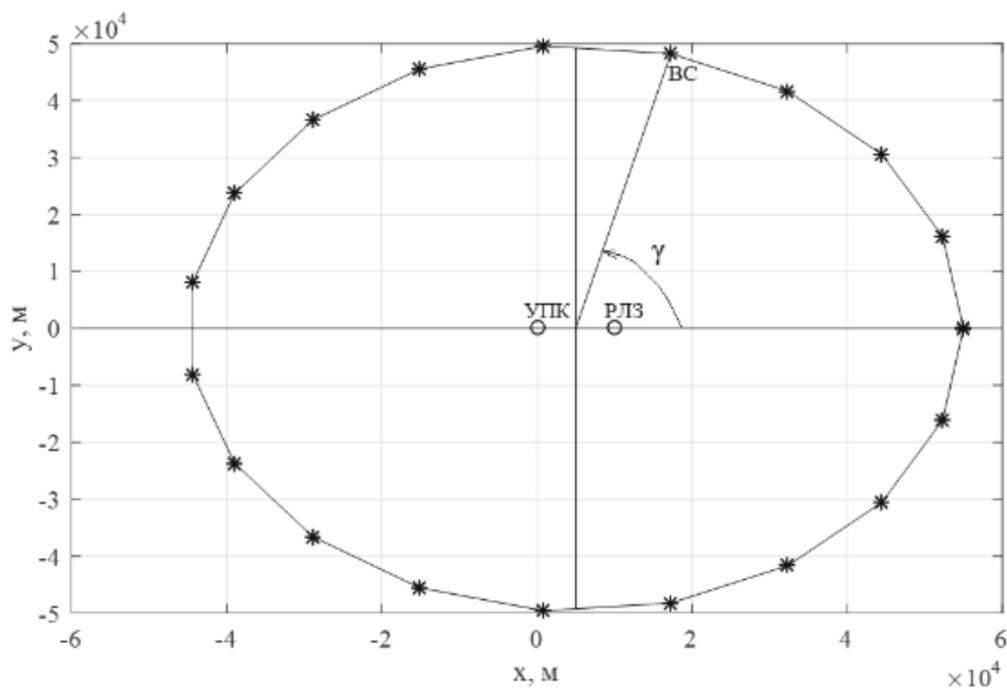


Рис. 6. Положения ВС относительно РЛЗ и УПК
Fig. 6. The aircraft locations related to the SSR and RAS

всенаправленной антенны подавления ответов на запросы, полученные по боковым лепесткам основной антенны РЛЗ, существует возможность отслеживать моменты излучения запросных сигналов с помощью анализа момента поступления импульса подавления, специально излучаемого всенаправленной антенной*. Однако в подобном случае в равной степени можно анализировать данный импульс и на СДК.

В связи с тем, что при анализе системы контроля следует рассматривать наихудшую ситуацию, рассмотрим случай отсутствия у РЛЗ антенны подавления ответов на запросы, полученные по боковым лепесткам антенны запросчика. Проведем сравнение точности работы СДК при отсутствии

априорных сведений о параметрах работы РЛЗ с точностью работы контролируемой системы БВРЛ при наличии у нее априорных сведений о периоде вращения антенны РЛЗ. При этом местоположение РЛЗ для СДК считается известным.

Зависимости СКО $\sigma_{\delta R}$ ошибки δR от величины γ для различных значений d^2 отношения сигнал/шум на выходе устройства обработки в УПК при приеме запросных сигналов представлены на рис. 7 для СДК и МВРЛ (а) и СДК и БВРЛ (б). При этом расстояние от ПП до РЛЗ полагается равным расстоянию от УПК до РЛЗ. Время анализа, в течение которого на СДК определяются значения параметров T_c и T , равно $N = 5$ оборотам антенны РЛЗ. Из рисунка видно, что в рассматриваемых условиях точность работы СДК всегда оказывается ниже точности работы системы МВРЛ при любом положении ВС относительно РЛЗ, но при некоторых условиях может оказаться выше точности работы системы БВРЛ. Так, если ВС располагается таким образом, что $\gamma = \pi$ для СДК и одновременно $\gamma = 2\pi$

* Авиационная электросвязь. Т. 4. Системы наблюдения и предупреждения столкновений // Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Международная организация гражданской авиации, 2007.

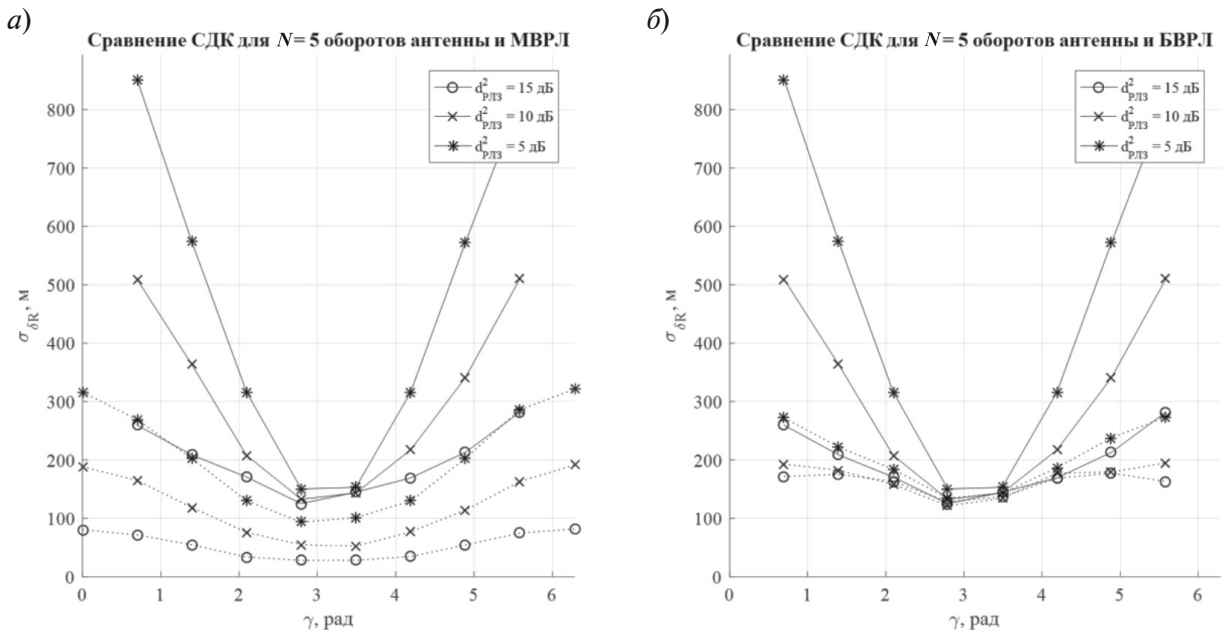


Рис. 7. СКО ошибки в определении местоположения ВС в СДК (—) и в контролируемых системах МВРЛ (а) и БВРЛ (б) (----)

Fig. 7. Aircraft location error standard deviation in the RCS (—) and in the controlled monostatic (a) and bistatic (б) SSR systems (----)

для БВРЛ, то точность работы СДК оказывается выше. Вместе с тем, для каждого значения угла γ в системе БВРЛ и для того же значения γ в СДК точность СДК неизбежно ниже точности системы БВРЛ, и разница в точности становится тем больше, чем ниже отношение сигнал/шум и чем ближе значение угла γ к 2π .

Заключение

В результате проведенного моделирования получены следующие результаты.

1. Распределение ошибки δR в работе СДК может быть аппроксимировано как частным случаем четырехпараметрического распределения (распределением Хойта), так и, с некоторой погрешностью, распределением Накагами. Качество данных аппроксимаций зависит от значения коэффициента корреляции r между случайными величинами δx и δy и ухудшается при приближении величины $|r|$ к единице. Такие аппроксимации позволяют определить моменты распределения ошибки δR аналитически.

2. Наихудшим для рассмотренного метода контроля случаев является тот, при котором в СДК отсутствует возможность определения моментов излучения запросных сигналов по импульсам, излучаемым дополнительной антенной РЛЗ. При этом ошибки, связанные с нестабильностью периода следования запросных сигналов, и ошибки, связанные с наличием АБГШ, в рассмотренных в работе условиях (при $\sigma_{\delta T_{ci}} \approx 5 \cdot 10^{-9}$, $\sigma_{\delta v_i} \approx 0,01$, $d^2 \approx 15$) оказывают примерно одинаковое влияние на точность работы СДК и влекут за собой ошибки в определении местоположения ВС с СКО порядка 100 м, в то время как ошибка, связанная с нестабильностью скорости вращения антенны РЛЗ, оказывает меньшее влияние и приводит к значению $\sigma_{\delta R}$, меньшему на несколько десятков метров. В этих же условиях прочие системные ошибки (связанные с эшелонированием высоты и с дискретным характером следования сигналов) приводят к меньшим примерно на порядок значениям СКО ошибок в определении местоположения ВС.

3. В отличие от СДК, в системах БВРЛ, как правило, известен режим работы РЛЗ. В подобной ситуации в худшем случае разница в точности работы СДК и контролируемой системы БВРЛ достигает нескольких сотен метров (так, при $d^2 = 5$ дБ различие в точности может достигать 600 м). Такой худший случай соответствует расположению ВС таким образом, что $\gamma = 2\pi$ для СДК и $\gamma = \pi$ для контролируемой ВРЛ. Наименьшая разница в точности рассматриваемых систем и одновременно с этим наименьшее значение $\sigma_{\delta R}$ достигается при расположении проекции ВС на одной линии с ПП, РЛЗ и УПК так, что $\gamma = \pi$ (так, точность работы СДК и системы БВРЛ оказывается сопоставимой и равной 150 м для всех рассмотренных значений d^2 , в то время как точность работы системы МВРЛ достигает примерно 20 м при $d^2 = 15$ дБ). Таким образом, для повышения точности работы СДК необходимо расположить УПК так, чтобы вероятность появления ВС была максимальной в области, обеспечивающей выполнение условия $\gamma = \pi$. Кроме того, точность работы СДК всегда ниже точности работы системы МВРЛ, но и в этом случае разли-

ца в точности работы данных систем оказывается минимальной (порядка 10–100 м для рассматриваемых значений d^2) также в случае расположения ВС, обеспечивающем $\gamma = \pi$.

Рассмотренные системы контроля могут быть отнесены к классу пассивных систем ВРЛ [14–17], в которых местоположение ВС определяется в результате анализа запросных сигналов РЛЗ другой, активной, системы ВРЛ и соответствующих ответных сигналов от ВС [2, 3, 12]. Такие системы находят применение в районах с активным воздушным движением и большим количеством близко расположенных аэропортов, в результате чего может оказаться нецелесообразным и, более того, нежелательным устанавливать классическую активную систему ВРЛ в каждом аэропорту. Применение пассивных систем ВРЛ позволяет снизить количество запросных сигналов в эфире. Однако в подобных системах положение РЛЗ является, в общем случае, неизвестным, и точность определения его местоположения неизбежно окажет влияние на точность работы системы в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skolnik M. Radar Handbook. 3rd ed. The McGraw-Hill Companies, 2008. 1350 p.
2. Otsuyama T., Honda J., Shiomi K., Minorikawa G., Hamanaka Y. Performance Evaluation of Passive Secondary Surveillance Radar for Small Aircraft Surveillance // European Radar Conf. (EuRAD). 2015. Pp. 505–508.
3. Shiomi K., Senoguchi A., Aoyama S. Development of Mobile Passive Secondary Surveillance Radar // 28th Internat. Congress of the Aeronautical Sciences, 2012
4. Аверьянов В.Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. Минск: Техника, 1978. 148 с.
5. Willis N.J., Griffiths H.D. Advances in Bistatic Radar. SciTech Publishing, Inc., 2007. 491 p.
6. Казаринов Ю.М., Коломенский Ю.А., Кутузов В.М., Леонтьев В.В., Маругин А.С., Орлов В.К., Подкопаев Б.П., Ульяницкий Ю.Д. Радиотехнические системы. М.: Академия, 2008. 590 с.
7. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.
8. Ковалев Ф.Н. Точность определения цели в бистатической радиолокационной системе // Радиотехника. 2013. № 8. С. 56–59.
9. Руководство по авиационному наблюдению. Международная организация гражданской авиации, 2010.
10. Zhang J., Liu W., Zhu Y. Study of ADS-B Data Evaluation. China Measurement & Test, 2013. No. 1.
11. Рыгов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. М.: Наука, 1976. 494 с.
12. Honda J., Otsuyama T. Estimation of Target Detection Rate in Aircraft Surveillance System // Internat. Conf. on Network-Based Information Systems. 2013. Pp. 561–565.
13. Fränken D., Hüpper A. Aircraft Positioning with Secondary Surveillance Radar and Time of Arrival Measurements // 14th Internat. Radar Symp. 2013.

14. **Kim E., Sivits K.** Blended secondary surveillance radar solutions to improve air traffic surveillance // *Aerospace Science and Technology*. 2015. Vol. 45. Pp. 203–208

15. **Wang Y., Bao Q., Wang D.** An Experimental Study of Passive Bistatic Radar Using Uncooperative Radar as a Transmitter // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2015. Vol. 12. Iss. 9. Pp. 1868–1872.

16. **Wang D., Bao Q., Tian R., Chen Z.** Bistatic weak target detection method using non-cooperative air surveillance radar // *Journal of Systems*

Engineering and Electronics. 2015. Vol. 26. Iss. 5. Pp. 954–963.

17. **Malanowski M.** Detection and parameter estimation of manoeuvring targets with passive bistatic radar // *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2012. Vol. 6, Iss. 8. Pp. 739–745.

18. **Загребин И.В., Романов А.В.** Модернизация электропривода вращения антенны вторичного радиолокатора «Корень-АС» // Прикладные задачи электромеханики, энергетики, электроники: труды региональной студенческой науч.-техн. конф. 2004. С. 21–24.

Статья поступила в редакцию 30.04.2017

REFERENCES

1. **Skolnik M.** *Radar Handbook*. 3rd Edition. The McGraw-Hill Company, 2008, 1350 p.

2. **Otsuyama T., Honda J., Shiomi K., Minorikawa G., Hamanaka Y.** Performance Evaluation of Passive Secondary Surveillance Radar for Small Aircraft Surveillance. *European Radar Conference (EuRAD)*, 2015, Pp. 505–508.

3. **Shiomi K., Senoguchi A., Aoyama S.** Development of Mobile Passive Secondary Surveillance Radar. *28th International Congress of the Aeronautical Sciences*, 2012

4. **Averyanov V.Ya.** *Raznesennyye radiolokatsionnyye stantsii i sistemy [Distant radar stations and systems]*. Minsk.: Tekhnika Publ., 1978, 148 p. (rus)

5. **Willis N.J., Griffiths H.D.** *Advances in Bistatic Radar*. SciTech Publishing, Inc., 2007, 491 p.

6. **Kazarinov Yu.M., Kolomenskiy Yu.A., Kutuzov V.M., Leontyev V.V., Marugin A.S., Orlov V.K., Podkopayev B.P., Ulyanitskiy Yu.D.** *Radiotekhnicheskiye sistemy [Radio engineering systems]*. Moscow: Akademiya Publ., 2008, 590 p. (rus)

7. **Klovskiy D.D.** *Peredacha diskretnykh soobshcheniy po radiokanalam [Transmission of discrete messages over radio channels]*. Moscow: Radio i svyaz Publ., 1982, 304 p. (rus)

8. **Kovalev F.N.** Tochnost opredeleniya tseli v bistaticheskoy radiolokatsionnoy sisteme [Target location accuracy in the bistatic radar]. *Radiotekhnika [Radioengineering]*, 2013, No. 8, Pp. 56–59. (rus)

9. *Rukovodstvo po aviatsionnomu nablyudeniyu. Mezhdunarodnaya organizatsiya grazhdanskoy aviatsii*, 2010. (rus)

10. **Zhang J., Liu W., Zhu Y.** Study of ADS-B Data Evaluation. *China Measurement & Test*, 2013, No. 1.

11. **Rytov S.M., Kravtsov Yu.A., Tatarskiy V.I.** *Vvedeniye v statisticheskuyu radiofiziku. Chast I [Introduction to Statistical Radiophysics. Part I]*.

Moscow: Nauka Publ., 1976, 494 p. (rus)

12. **Honda J., Otsuyama T.** Estimation of Target Detection Rate in Aircraft Surveillance System. *International Conference on Network-Based Information Systems*, 2013, Pp. 561–565.

13. **Fränken D., Hüpper A.** Aircraft Positioning with Secondary Surveillance Radar and Time of Arrival Measurements. *14th Internat. Radar Symposium (IRS)*, 2013.

14. **Kim E., Sivits K.** Blended secondary surveillance radar solutions to improve air traffic surveillance. *Aerospace Science and Technology*, 2015, Vol.45, Pp. 203–208.

15. **Wang Y., Bao Q., Wang D.** An Experimental Study of Passive Bistatic Radar Using Uncooperative Radar as a Transmitter. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, Vol. 12, Issue 9, Pp. 1868–1872.

16. **Wang D., Bao Q., Tian R., Chen Z.** Bistatic weak target detection method using non-cooperative air surveillance radar. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2015, Vol. 26, Issue 5, Pp. 954–963.

17. **Malanowski M.** Detection and parameter estimation of manoeuvring targets with passive bistatic radar. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, Vol. 6, Issue 8, Pp. 739–745.

18. **Zagrebina I.V., Romanov A.V.** Modernizatsiya elektroprivoda vrashcheniya anteny vtorichnogo radiolokatora “Koren-AS” [Modernization of the electric drive of rotation of the antenna of the secondary radar “Koren-AS”]. *Prikladnyye zadachi elektromekhaniki, energetiki, elektroniki: Trudy regionalnoy studencheskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Proceedings of the Regional Student Scientific and Technical Conference “Applied Problems of Electromechanics, Power Engineering, Electronics”]*, 2004, Pp. 21–24. (rus)

Received 30.04.2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

ЦИКИН Игорь Анатольевич

TSIKIN Igor A.

E-mail: tsikin@mail.spbstu.ru

ПОКЛОНСКАЯ Екатерина Сергеевна

POKLONSKAYA Ekaterina S.

E-mail: catherine091@mail.ru