

УДК 629.7.058.6

DOI 10.51955/2312-1327_2023_4_63

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАКОНА АБЕРРАЦИИ В РАДИОНАВИГАЦИИ И АВИАЦИОННОМ НАБЛЮДЕНИИ

Евгений Андреевич Рубцов,
orcid.org/0000-0003-2126-0015,
кандидат технических наук

Российский университет транспорта (МИИТ),
ул. Образцова, д. 9
Москва, 127994, Россия
Rubtsov.rut.miit@gmail.com

Аннотация. Проанализирован потенциал использования закона аберрации, который описывает отклонение измеряемых параметров наблюдаемого объекта при изменении его местоположения относительно наблюдателя. Этот закон был исследован с точки зрения его применения в средствах радионавигации и авиационного наблюдения. В ходе исследования были получены зависимости отклонений в значениях наблюдаемых и реальных (истинных) характеристик объекта наблюдения для таких средств радиотехнического обеспечения полетов, как первичный радиолокатор, радиомаяк дальномерный (DME) и наземная станция автоматического зависимого наблюдения. При этом скорость движения объекта наблюдения задавалась равной 250 м/с (характерна для существующих самолетов) и 600 м/с (характерна для перспективных сверхзвуковых самолетов). Из результатов расчетов следует, что эффект аберрации не может быть обнаружен для задач определения наклонной дальности или длительности импульса в связи с несовершенством существующих средств измерения. Однако, эффект аберрации может быть зафиксирован при решении задач определения временного интервала между зондирующими импульсами первичного радиолокатора или сообщениями автоматического зависимого наблюдения, а также при определении частоты сигнала DME. Это достигается за счет достаточно большого динамического диапазона измеряемых величин. Для приведенной в работе методики оценки эффекта аберрации была произведена оценка чувствительности к ошибкам измерения скорости движения объекта наблюдения, а также к погрешностям измеряемых величин. Подтверждена возможность применения закона аберрации на практике в средствах радионавигации и авиационного наблюдения, что позволит увеличить точность определения координат и параметров движения ВС, а также расширить возможности имеющегося оборудования.

Ключевые слова: аберрация, истинные параметры, наблюдаемые параметры, средства радионавигации, средства авиационного наблюдения.

CONCERNING THE ABERRATION LAW APPLICATION IN RADIO NAVIGATION AND AIRCRAFT SURVEILLANCE

Evgeny A. Rubtsov,
orcid.org/0000-0003-2126-0015,
Candidate of Technical Sciences
Russian University of Transport (MIIT),
9, Obraztsova Street
Moscow, 127994, Russia
Rubtsov.rut.miit@gmail.com

Abstract. The author analyzes the potential use of the aberration law which describes the deviation of measured parameters of an observed object as it changes its position relative to the observer. The law was studied in terms of its application in radio navigation and aircraft surveillance. During research the author obtained dependences of deviations of observable and real (true) characteristics of an observed object for such aids of radio-technical support of flights as a primary radar, distance measuring equipment (DME) and a ground station of automatic dependent surveillance. In doing so, the speed of the observed object was set equal to 250 m/s (typical for existing airplanes) and 600 m/s (specific for perspective supersonic airplanes). It follows from the calculations that the aberration effect cannot be detected for determining slant range or pulse duration tasks due to the imperfection of the existing measuring instruments. However, the aberration effect can be detected in the tasks of determining the time interval between probing pulses of the primary radar or automatic dependent surveillance messages, as well as in the determination of the frequency of the DME signal. This is achieved due to a sufficiently large dynamic range of the measured values. For the method of evaluating the aberration effect given in the paper the author performed estimation of the sensitivity to the errors of the measured value and the velocity of the observed object. The research confirmed possibility to apply the law of aberration in practice for radio navigation aids and aircraft surveillance, which can increase accuracy of position-fixing and determination of aircraft movement parameters as well as to expand capabilities of the available equipment.

Key words: aberration, true parameters, observed parameters, radio navigation aids, aircraft surveillance aids.

Введение

С увеличением количества полетов на воздушных трассах и в районе аэродрома, а также с ростом числа взлетно-посадочных операций, возникает потребность в ужесточении требований к интервалам эшелонирования, а также в более точном определении местоположения воздушных судов (ВС) и параметров их движения с помощью современных радиотехнических средств (РТС) навигации и наблюдения. В связи с этим, актуальными являются исследования, направленные на повышение точности определения координат ВС.

В работах [Плясовских, 2022а; Плясовских, 2022б] был предложен закон aberrации, который описывает отклонение измеряемого местоположения (или иного параметра) наблюдаемого объекта от истинной величины при движении объекта относительно точки наблюдения. Отклонение наблюдаемых параметров обусловлено задержкой в поступлении данных о параметрах из-за конечной скорости распространения радиоволн.

Эффект Доплера является частным случаем эффекта aberrации [Плясовских, 2022а; Плясовских, 2022б] и применяется в различных радиотехнических средствах гражданской авиации: допплеровском измерителе скорости и угла сноса, допплеровском азимутальном радиомаяке DVOR, автоматическом радиопеленгаторе, а также первичном радиолокаторе в режиме селекции движущихся целей. Таким образом, оценка других параметров объекта наблюдения, изменяющихся вследствие его движения относительно наблюдателя, позволит расширить возможности имеющегося оборудования.

Закон aberrации обобщает эффекты, присутствующие при наблюдении подвижного объекта и позволяет оценить разницу в истинных и наблюдаемых параметрах: расстояние до объекта, его протяженность, пройденный путь, скорость, длительность отраженного или передаваемого от объекта сигнала,

задержку сигнала при отражении от объекта или передачи с объекта.

Целью статьи является оценка потенциала использования закона аберрации при решении практических задач (для средств радионавигации и авиационного наблюдения) определения местоположения ВС с применением:

1) первичного радиолокатора (ПРЛ): оценивается измеряемая наклонная дальность до ВС, длительность зондирующего импульса и временной интервал между импульсами;

2) дальномерного радиомаяка (distance measuring equipment, DME): оценивается измеряемая наклонная дальность до ВС, временной интервал между парой импульсов сигналов системы DME;

3) наземной станции автоматического зависимого наблюдения вещательного типа (АЗН-В): оценивается временной интервал между импульсами преамбулы, а также временной интервал между сообщениями АЗН-В.

Материалы и методы

Математическое выражение закона аберрации отличается простотой и лаконичностью. Эффекты аберрации для наблюдаемых $Q_{\text{наб}}$ и истинных $Q_{\text{ист}}$ параметров объекта могут быть выражены как [Рубцов, 2022]:

$$Q_{\text{наб}} = \frac{Q_{\text{ист}}}{1 \pm \frac{v_{\text{ист}}}{c}}, \quad (1)$$

$$Q_{\text{ист}} = Q_{\text{наб}} \left(1 \pm \frac{v_{\text{ист}}}{c} \right), \quad (2)$$

где $v_{\text{ист}}$ – истинная скорость объекта наблюдения;

c – скорость распространения радиоволн.

Разность $Q_{\text{наб}} - Q_{\text{ист}}$, возникающая за счет эффекта аберрации, может быть выявлена и использована, например, для повышения точности определения местоположения ВС. Выражение (2) позволяет выявить погрешности определения параметров объекта, обусловленные его движением.

Для скоростей, характерных для современных самолетов, модуль разности $Q_{\text{наб}} - Q_{\text{ист}}$ не будет зависеть от того, приближается объект к точке наблюдения или удаляется. Для объектов с большими скоростями (например, космических аппаратов) требуется учитывать направление движения объекта: от наблюдателя или на него.

Для рассматриваемых систем радионавигации и авиационного наблюдения возможен анализ измеряемой наклонной дальности до ВС R , длительности зондирующего импульса первичного радиолокатора $\tau_{\text{ПРЛ}}$, временной интервал между импульсами ПРЛ $t_{\text{ПРЛ}}$, временной интервал между парой импульсов сигналов системы DME t_{DME} , временной интервал между импульсами преамбулы $\Delta t_{\text{АЗН-В}}$, сообщения АЗН-В, временной интервал между сообщениями АЗН-В $t_{\text{АЗН-В}}$ [Рубцов, 2022]:

$$R_{\text{ист}} = R_{\text{наб}} \left(1 - \frac{v_{\text{ист}}}{c} \right), \quad (3)$$

$$\tau_{\text{ПРЛ_ист}} = \tau_{\text{ПРЛ_наб}} \left(1 - \frac{v_{\text{ист}}}{c} \right), \quad (4)$$

$$t_{\text{ПРЛ_ист}} = t_{\text{ПРЛ_наб}} \left(1 - \frac{v_{\text{ист}}}{c} \right), \quad (5)$$

$$t_{\text{ДМЕ_ист}} = t_{\text{ДМЕ_наб}} \left(1 - \frac{v_{\text{ист}}}{c} \right), \quad (6)$$

$$\Delta t_{\text{АЗН-В_ист}} = \Delta t_{\text{АЗН-В_наб}} \left(1 - \frac{v_{\text{ист}}}{c} \right), \quad (7)$$

$$t_{\text{АЗН-В_ист}} = t_{\text{АЗН-В_наб}} \left(1 - \frac{v_{\text{ист}}}{c} \right). \quad (8)$$

Выражения (3-8) учитывают истинную скорость полета ВС. Если самолет приближается к наблюдателю, то его измеряемая (наблюдаемая) скорость $v_{\text{наб}}$ равна [Плясовских, 2022а; Плясовских, 2022б]:

$$v_{\text{наб}} = \frac{v_{\text{ист}}}{1 - \frac{v_{\text{ист}}}{c}}. \quad (9)$$

Тогда, истинная скорость ВС находится как:

$$v_{\text{ист}} = \frac{v_{\text{наб}}}{1 + \frac{v_{\text{наб}}}{c}}. \quad (10)$$

Таким образом, выражения (3-8) и (10) позволяют определить разность между истинными и измеряемыми (наблюдаемыми) параметрами ВС.

Следует учесть, что измерения параметров ВС проводятся с некоторой погрешностью ΔQ :

$$Q_{\text{наб}}^* = Q_{\text{наб}} + \Delta Q, \quad (11)$$

Аналогично, следует учитывать погрешности измерения $\Delta v_{\text{наб}}$ при расчете истинной скорости ВС:

$$v_{\text{ист}}^* = \frac{(v_{\text{наб}} + \Delta v_{\text{наб}})}{1 + \frac{v_{\text{наб}} + \Delta v_{\text{наб}}}{c}}. \quad (12)$$

Путем подставки выражений (11) и (12) в (3-8), найдем скорректированные значения измеряемых (наблюдаемых) параметров [Рубцов, 2022]:

$$Q_{\text{ист}}^* = Q_{\text{наб}}^* \left(1 - \frac{v_{\text{ист}}^*}{c} \right) \quad (13)$$

Тогда чувствительность методики S к погрешностям измеряемых (наблюдаемых) значений находится как [Рубцов, 2022]:

$$S = (Q_{\text{наб}} - Q_{\text{ист}}) - (Q_{\text{наб}}^* - Q_{\text{ист}}^*) \quad (14)$$

При оценке чувствительности необходимо задать диапазон погрешностей измеряемых величин и определить влияние погрешности на выходные значения.

Результаты

Выполним расчет разности $Q_{\text{наб}} - Q_{\text{ист}}$ для различных параметров, измеряемых с помощью средств радионавигации и авиационного наблюдения. Скорость полета современных самолетов примем равной 900 км/ч или 250 м/с. Также учтем перспективы развития гражданской авиации в плане внедрения сверхзвуковых ВС, чья крейсерская скорость будет составлять примерно 2 Маха или 600 м/с [Sun et al., 2022; Estimating supersonic..., 2021].

Полученные результаты расчета разности $Q_{\text{наб}} - Q_{\text{ист}}$, выполненного по

выражениям (3-8) и (10), представлены на рис. 1 (метки зеленого цвета соответствуют скорости 250 м/с, метки красного цвета – 600 м/с).

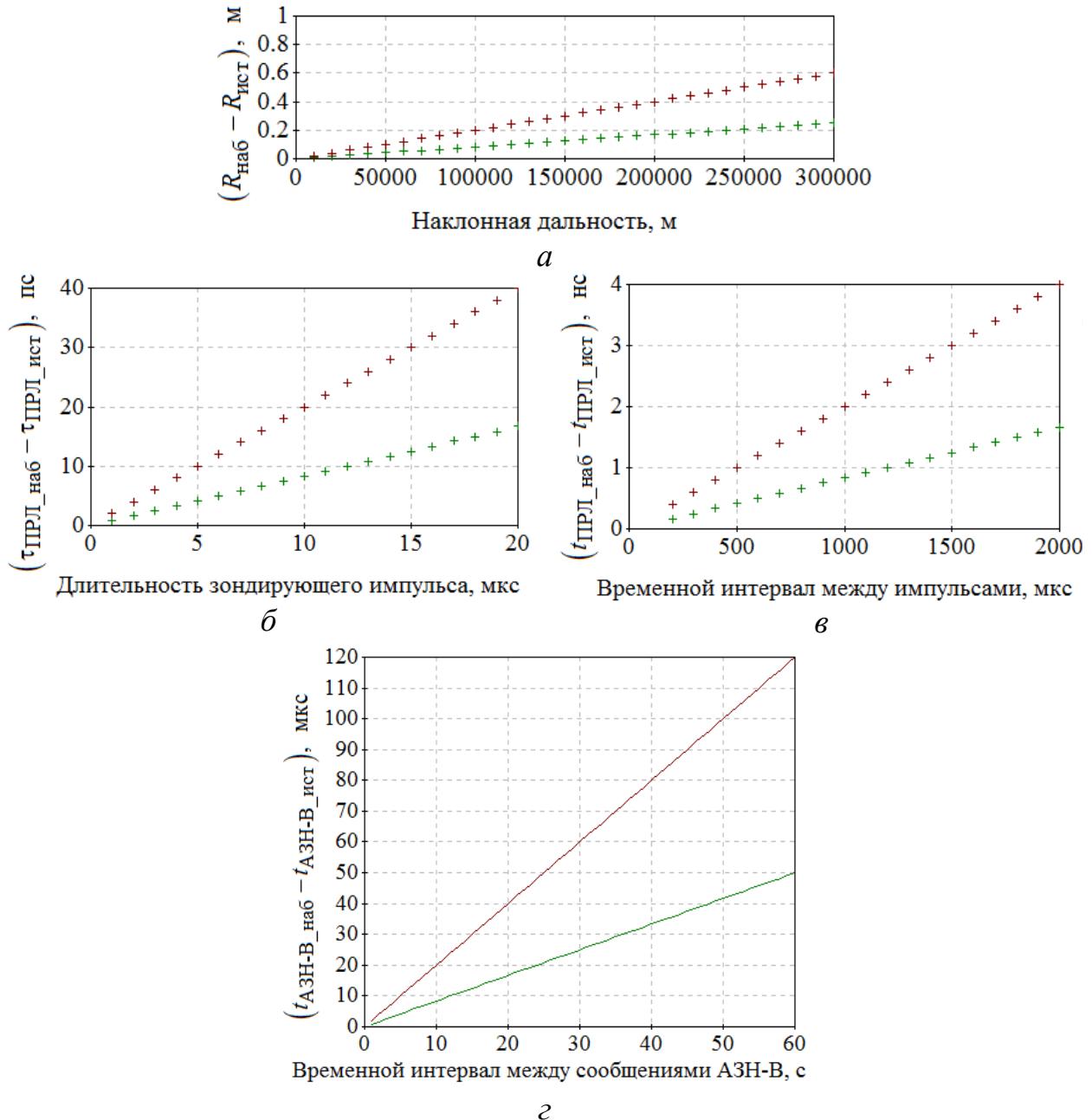


Рисунок 1 – Оценка разности $Q_{\text{наб}} - Q_{\text{ист}}$ для: *a* – наклонной дальности до ВС; *б* – длительности зондирующего импульса ПРЛ; *в* – временного интервала между импульсами ПРЛ; *г* – временного интервала между сообщениями АЗН-В

Измеряемая наклонная дальность ограничивается значением 300 км, что характерно для магистральных ВС, выполняющих полет на высоте порядка 10000 м. Результаты расчетов (рис. 1а) позволяют сделать вывод о практической невозможности регистрации эффекта аберрации при оценке наклонной дальности до ВС, поскольку разность $R_{\text{наб}} - R_{\text{ист}}$ составляет не более 1 м, а погрешности DME или дальномерного канала радиолокатора достигают десятков и сотен метров.

Длительность зондирующего импульса ПРЛ или первичного канала

радиолокационного комплекса на примере «Лира-ТВК» составляет 2,5...2,9 и 1,0...1,2 мкс (в режимах «редкий» и «частый» соответственно) [Радиолокационная станция..., ЦИВР.462418.014РЭ]. Для расчетов примем значения длительности зондирующего импульса 1...20 мкс (рис. 1б). Изменение длительности зондирующего импульса составляет десятки пикосекунд, поэтому для выявления эффекта аберрации потребуется аппаратура высокой точности, что в настоящее время либо технически не реализуемо, либо потребует значительных затрат на модернизацию оборудования.

Временной интервал между импульсами ПРЛ или первичного канала радиолокационного комплекса на примере «Лира-ТВК» составляет 300 и 1000 мкс (в режимах «редкий» и «частый» соответственно) [Радиолокационная станция..., б. г.]. Для расчетов примем значения интервала между импульсами 200...2000 мкс (рис. 1в). Поскольку изменения временного интервала составляют единицы наносекунд, применение закона аберрации возможно и технически реализуемо (что, однако, потребует модернизации аппаратуры измерения для достижения требуемой точности). Наблюдаемый эффект может быть использован в радиолокации при реализации селекции движущихся целей, при этом в отличие от применяемого в настоящее время метода, основанного на сравнении частот и фаз излучаемого и принимаемого сигнала, «слепые скорости» будут отсутствовать.

Согласно эксплуатационной документации [Радиомаяк дальномерный..., б. г.] временной интервал между импульсами сигнала запроса, излучаемого самолетным дальномером, составляет 12 или 36 мкс (для каналов X и Y соответственно). Временной интервал между импульсами сигнала ответа, излучаемого наземным маяком DME, составляет 12 или 30 мкс (для каналов X и Y соответственно). Для расчетов значения интервала времени между парами импульсов зададим равными 12, 30, 36 мкс. В таблице 1 представлены результаты расчетов разности $t_{\text{DME_наб}} - t_{\text{DME_ист}}$, для временных интервалов между парой импульсов при скоростях движения ВС 250 и 600 м/с. Видно, что для регистрации и эффекта аберрации требуется обеспечить точность определения временных интервалов в единицы пикосекунд. На сегодняшний день при формировании пар импульсов в канале запроса обеспечивается точность задания интервала времени 1 мкс, в канале ответа – 0,1 мкс, что намного превышает требуемую точность [Радиомаяк дальномерный..., б. г.; Приемоответчик..., б. г.]. Поэтому для систем DME при оценке измеряемой наклонной дальности применение закона аберрации в настоящее время технически не реализуемо, поскольку требует значительного улучшения характеристик оборудования для возможности оценки пикосекундных изменений временных интервалов.

Таблица 1 – Результаты расчетов разности $t_{\text{DME_наб}} - t_{\text{DME_ист}}$

$t_{\text{DME_наб}}, \text{мкс}$	$t_{\text{DME_наб}} - t_{\text{DME_ист}}, \text{пс}$ (при скорости ВС 250 м/с)	$t_{\text{DME_наб}} - t_{\text{DME_ист}}, \text{пс}$ (при скорости ВС 600 м/с)
12	10	24
30	25	60
36	30	72

Система DME рассматривается международной организацией гражданской авиации как альтернативная для спутниковой навигационная система, способная обеспечить требуемые навигационные характеристики [Guo, 2021; Present and Future..., 2020]. Поэтому важной задачей является разработка методик увеличения точности измерения местоположения ВС, а также расширения функционала существующего оборудования. При движении ВС относительно радиомаяка DME будет наблюдаться сдвиг частоты принимаемого самолетным дальномером сигнала ответа вследствие эффекта Доплера (частный случай проявления закона аберрации). Оценим разность наблюдаемой и истинной частот $F_{\text{наб}} - F_{\text{ист}}$, ее зависимость от скорости движения ВС. В качестве наблюдаемых частот примем рабочую частоту DME (1000 МГц), а также частоту первичного радиолокатора (3000 МГц) при скорости наблюдаемого объекта относительно наблюдателя 50...500 м/с (рис. 2). Результаты расчета, представленные на графиках (рис. 2), позволяют сделать вывод о возможности измерения разности частот и применения эффекта аберрации на практике (например, для получения на борту ВС его скорости движения относительно радиомаяка DME, а также для получения скорости движения ВС относительно позиции размещения ПРЛ).

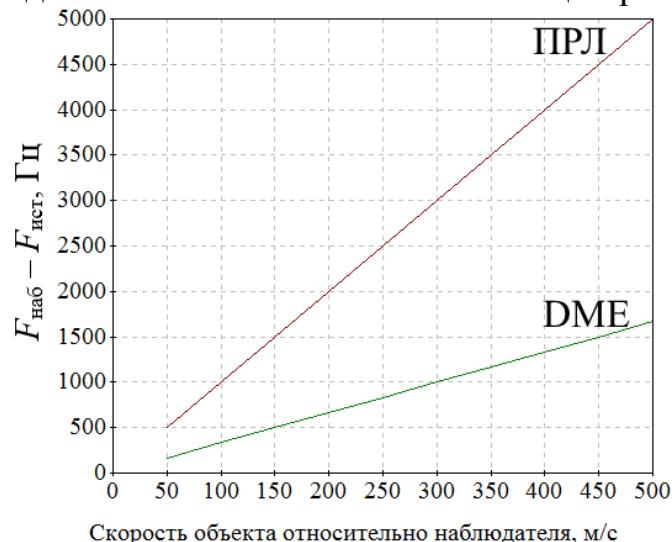


Рисунок 2 – Результаты расчетов разности наблюдаемых и истинных частот $F_{\text{наб}} - F_{\text{ист}}$ для первичного радиолокатора и системы DME при различных скоростях движения ВС относительно позиции размещения РТС

Согласно действующим стандартам [Руководство..., 2020; Minimum operational..., 2009], сообщение АЗН-В, передаваемое по линии 1090ES, содержит преамбулу, состоящую из четырех импульсов (рис. 3). Временные интервалы между первым и последующими импульсами преамбулы составляют 1, 3,5 и 4,5 мкс, а между первым импульсом преамбулы и началом блока данных – 8 мкс.

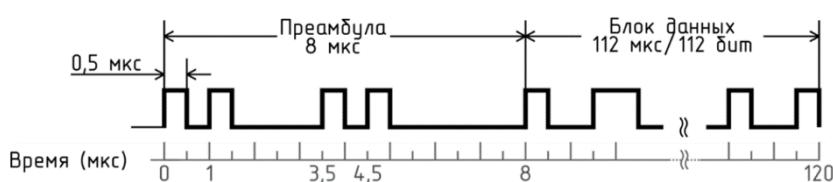


Рисунок 3 – Формат сигнала 1090ES

В таблице 2 представлены результаты расчетов разности $\Delta t_{АЗН-В_наб} - \Delta t_{АЗН-В_ист}$, для временных интервалов между импульсами преамбулы при скоростях движения ВС 250 и 600 м/с. Полученные значения разности, обусловленные эффектом аберрации, составляют единицы наносекунд; их измерение технически возможно, однако потребует значительного повышения точности измерения временных интервалов и удорожания оборудования.

Таблица 2 – Результаты расчетов разности $\Delta t_{АЗН-В_наб} - \Delta t_{АЗН-В_ист}$

$\Delta t_{АЗН-В_наб}$, мкс	$\Delta t_{АЗН-В_наб} - \Delta t_{АЗН-В_ист}$, нс (при скорости ВС 250 м/с)	$\Delta t_{АЗН-В_наб} - \Delta t_{АЗН-В_ист}$, нс (при скорости ВС 600 м/с)
1	1	2
3,5	3	7
4,5	4	9
8	7	16

В настоящее время для передачи данных АЗН-В в России широко применяется линия 1090ES, при этом сигнал формируется в режиме самогенерации с максимальной частотой передачи два сообщения в секунду [Сертификационные..., 2018; Наземная станция..., б. г.]. В автоматизированных системах управления воздушным движением, либо в наземных станциях АЗН-В возможно накопление сообщений и анализ их параметров, в частности, определение интервала времени между сообщениями.

Выполним расчет разности $Q_{наб} - Q_{ист}$ для оцениваемого временного интервала между сообщениями АЗН-В в диапазоне 1...60 с. Результаты расчета приведены на рис. 1г, при этом видно, что современные технические средства могут выявить эффект аберрации, поскольку разность между измеряемым (наблюдаемым) и истинным значением интервала между сообщениями АЗН-В достигает десятков микросекунд [Рубцов, 2022].

В последнее время для гражданской авиации остро стоит проблема спуфинга [Wang et al., 2020], для решения которой возможно применение эффекта аберрации с целью выявления стационарных источников, преднамеренно формирующих ложные сигналы АЗН-В [Калинцев и др., 2020]. В наземной станции АЗН-В потребуется только модернизация программного обеспечения, без доработки аппаратных блоков. Также должна обеспечиваться требуемая точность задания периода генерации сообщений АЗН-В в бортовом ответчике [Рубцов, 2022].

Проведенный анализ показал, что в ряде случаев эффект аберрации не может быть технически выявлен и применен на практике из-за крайне малой величины разности наблюдаемого и истинного параметров объекта. Целесообразно оценить зависимость эффекта аберрации от величины наблюдаемого параметра и скорости движения объекта относительно наблюдателя (рис. 4, таблица 3).

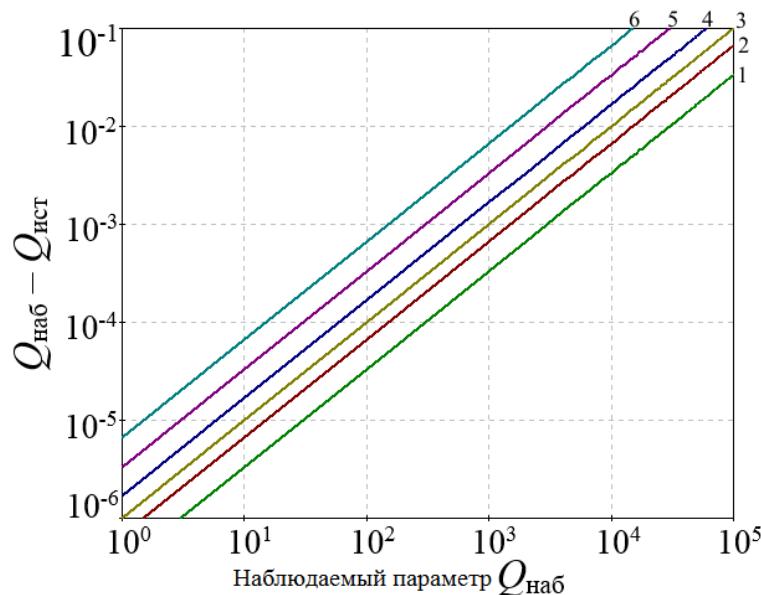


Рисунок 4 – Зависимость разности $Q_{\text{наб}} - Q_{\text{ист}}$ от значений наблюдаемого параметра $Q_{\text{наб}}$ при скорости движения объекта:

1 – 100 м/с; 2 – 200 м/с; 3 – 300 м/с; 4 – 500 м/с; 5 – 1000 м/с; 6 – 2000 м/с

Таблица 3 – Результаты расчетов разности $Q_{\text{наб}} - Q_{\text{ист}}$ при различных значениях наблюдаемого параметра $Q_{\text{наб}}$ и скорости ВС

$Q_{\text{наб}}$	Разность $Q_{\text{наб}} - Q_{\text{ист}}$ при скорости объекта наблюдения, м/с					
	100	200	300	500	1000	2000
10	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$
100	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$
1000	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,0017	0,0033	0,0067
10000	0,0033	0,0066	0,010	0,017	0,033	0,067
100000	0,0330	0,0660	0,100	0,17	0,33	0,67

Из приведенных на рис. 4 графиков и таблицы 3 видно, что при сравнительно небольших скоростях движения объекта разность $Q_{\text{наб}} - Q_{\text{ист}}$ по отношению к наблюдаемой величине $Q_{\text{наб}}$ имеет довольно малую величину (порядка $10^{-4} \dots 10^{-6}$ от наблюдаемой величины), поэтому для выявления и применения на практике эффекта аберрации требуется выбирать величины, наблюдаемые с высокой точностью при достаточно большом динамическом диапазоне. К таким величинам можно отнести время, которое в современном авиационном оборудовании измеряется в диапазоне от секунд до микросекунд (в перспективных системах до наносекунд) с точностью до единицы или долей микросекунды, а также частоту радиосигнала, измеряемой в диапазоне от гигагерц до килогерц с погрешностью в десятки герц (в ряде случаев – единицы герц).

Оценка чувствительности методики S производилась путем учета погрешностей измерения параметров объекта наблюдения согласно выражению (14). На рис. 5а представлен результат оценки чувствительности при измерении временного интервала между импульсами ПРЛ, равного 1000 мкс с учетом погрешности наблюдаемой величины $\Delta t_{\text{ПРЛ,наб}}$ (в диапазоне 0...50 мкс) и

скорости объекта $\Delta V_{\text{наб}}$ (в диапазоне 0...20 м/с). Зависимость величины S от погрешностей линейная, вклад погрешностей $\Delta t_{\text{ПРЛ_наб}}$ и $\Delta V_{\text{наб}}$ примерно равнозначен. Сама величина S при максимальных значениях погрешностей не превышает 0,1 нс или 12 % от разности $t_{\text{ПРЛ_наб}} - t_{\text{ПРЛ_ист}}$.

Оценка чувствительности методики при измерении временного интервала между сообщениями автоматического зависимого наблюдения, принятого равным 10 с, представлена на рис. 5б. При расчете применялись погрешности измеряемой (наблюдаемой) величины $\Delta t_{\text{АЗН-В_наб}}$ равные 0...0,01 с, а также погрешности определения скорости объекта $\Delta V_{\text{наб}}$ равные 0...20 м/с. Как видно из рисунка, зависимость величины S от погрешностей линейная, наибольший вклад вносит погрешность определения скорости $\Delta V_{\text{наб}}$. Сама величина S при максимальных значениях погрешностей не превышает 0,6 мкс или 8 % от разности $t_{\text{АЗН-В_наб}} - t_{\text{АЗН-В_ист}}$ [Рубцов, 2022].

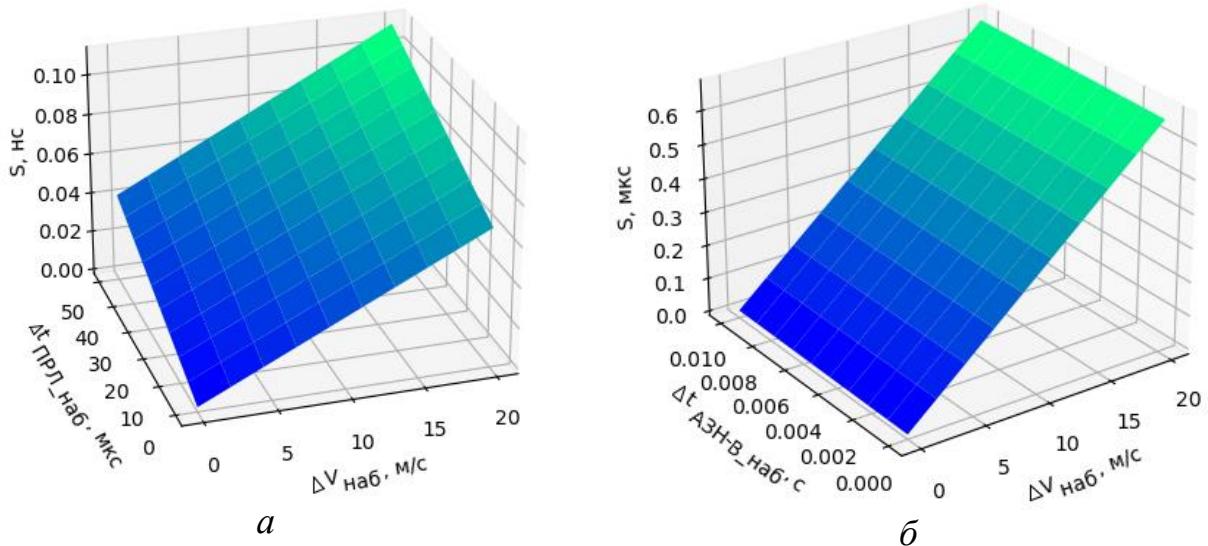


Рисунок 5 – Графики оценки чувствительности S при измерении:
 a – временного интервала между импульсами ПРЛ; \mathfrak{b} – временного интервала между сообщениями автоматического зависимого наблюдения

Таким образом, закон aberrации [Плясовских, 2022а; Плясовских, 2022б] может быть применен для коррекции измеренных параметров путем учета разности между измеряемой и истинной величиной $Q_{\text{наб}} - Q_{\text{ист}}$, а также для решения следующих задач:

- селекция движущихся целей в ПРЛ без наличия «слепых скоростей»;
- получение на борту ВС его скорости движения относительно радиомаяка DME;
- получение скорости движения ВС относительно позиции размещения ПРЛ;
- выявление стационарных источников, преднамеренно формирующих ложные сигналы АЗН-В (спуфинг).

Дискуссия

Проведенный анализ позволил оценить возможность применения закона aberrации [Плясовских, 2022а; Плясовских, 2022б] в радиотехнических системах навигации и наблюдения и определить условия, при которых наблюдение и применение эффектов aberrации технически реализуемо. При этом рассматривался полет ВС по прямолинейному маршруту, проходящему через точку размещения наземного радиотехнического средства. Интерес представляет анализ наблюдаемых эффектов aberrации при выполнении ВС разворота, а также при движении с ускорением.

Другим направлением дальнейших исследований является учет эффектов aberrации, проявляющихся при независимом некооперативном наблюдении объектов с быстродвижущимися элементами. Это могут быть вертолеты, а также беспилотные воздушные суда вертолетного типа. В настоящее время имеются работы, посвященные анализу микродоплеровского сдвига частоты и изменения спектра отраженного радиосигнала [Zhou et al., 2020; Victor, 2019], однако требуется выполнить анализ всех возможных эффектов aberrации и оценить возможность их практического применения.

Как видно из рис. 4, эффекты aberrации проявляются тем сильнее, чем выше скорость движения объекта относительно наблюдателя, поэтому в дальнейшем целесообразно рассмотреть вопросы применения закона aberrации для систем спутниковой радионавигации и связи с космическими аппаратами.

В дальнейшей работе планируется провести имитационное моделирование измерения местоположения и параметров движения ВС с помощью средств радионавигации и авиационного наблюдения, а также обработку реальных измерений для подтверждения достоверности и применимости на практике теоретических положений и результатов расчетов.

Заключение

Произведен анализ потенциала использования закона aberrации для средств радионавигации и авиационного наблюдения: первичного радиолокатора, системы DME, наземной станции АЗН-В. Рассмотрен случай полета ВС к точке расположения РТС (точке наблюдения) со скоростями 250 и 600 м/с и рассчитана разность наблюдаемых и истинных параметров $Q_{\text{наб}} - Q_{\text{ист}}$.

Расчет показал, что в ряде случаев эффект aberrации не может быть технически выявлен и применен на практике из-за крайне малой величины разности наблюдаемого и истинного параметров объекта, составляющей порядка $10^{-4} \dots 10^{-6}$ от наблюдаемой величины. Так, при оценке наклонной дальности, длительности зондирующего импульса ПРЛ и временного интервала между импульсами сигнала DME технически невозможно выявить эффект aberrации.

Для решения этой задачи необходимо выбирать величины, наблюдаемые с высокой точностью при достаточно большом динамическом диапазоне: временной интервал между импульсами ПРЛ, временной интервал между сообщениями АЗН-В, а также частоту принимаемого сигнала.

Общая практическая польза от выявления эффектов aberrации заключается в уменьшении погрешности измеряемых параметров путем учета

разности между измеряемой и истинной величиной $Q_{\text{наб}} - Q_{\text{ист}}$.

Проведенный анализ показал, что наблюдение эффектов аберрации может быть реализовано в таких средствах радионавигации и авиационного наблюдения, как:

- первичная обзорная радиолокационная станция или первичный канал радиолокационного комплекса, что позволит определять скорость ВС относительно позиции размещения радиолокатора, а также для совершенствования селекции движущихся целей и устранения эффекта «слепых скоростей»;

- дальномерные системы ближней навигации DME, что позволит оценить скорость движения ВС относительно радиомаяка и получения дополнительной навигационной информации на борту;

- наземные станции АЗН-В, что позволит выявлять стационарные источники, преднамеренно формирующие ложные сигналы АЗН-В (спуфинг), при этом не требуется доработка наземной станции.

Оценена чувствительность методики для случаев измерения временного интервала между импульсами ПРЛ и сообщениями автоматического зависимого наблюдения путем учета погрешности измеряемого параметра и погрешности определения скорости ВС. Зависимость чувствительности от указанных погрешностей линейная (рис. 5).

В дальнейшем планируется провести имитационное моделирование измерения местоположения и параметров движения ВС и обработку реальных измерений для подтверждения достоверности и применимости на практике теоретических положений и результатов расчетов. Также планируется провести исследование проявления эффектов аберрации при криволинейном движении ВС и движении с ускорением, при независимом некооперативном наблюдении объектов с быстродвижущимися элементами (вертолетов и беспилотных воздушных судов вертолетного типа), а также провести анализ возможности применения закона аберрации для систем спутниковой радионавигации и связи с космическими аппаратами.

Библиографический список

Калинцев А. С. Методика выявления ложных преднамеренно формируемых сигналов АЗН-В / А. С. Калинцев, Е. А. Рубцов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 11. С. 4-13. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-11-4-13.

Наземная станция АЗН-В 1090ES НС-1А. Руководство по эксплуатации. РШПИ.461515.003РЭ. 76 с.

Плясовских А. П. Закон аберрации и его приложения в навигации и управлении воздушным движением: монография. М.: Знание-М, 2022. 71 с. ISBN 978-5-00187-223-8. EDN IEMXKB.

Плясовских А. П. К вопросу аберрации при продольном движении материальной точки относительно наблюдателя // Современные научные исследования и инновации, 2022. № 2(130) // [Электронный ресурс]. 2022. URL: <https://web.s nauka.ru/issues/2022/02/97670> (дата обращения: 12.08.2022). EDN TOQBVR

Приемоответчик DME/NL 2700. Руководство по эксплуатации. АЕСФ.461511.004-01РЭ. 75 с. Радиолокационная станция «Лира-ТВК». Руководство по эксплуатации. Часть I. Описание и работа РЛС. ЦИВР.462418.014РЭ. 82 с.

Радиомаяк дальномерный DME 2000. Руководство по эксплуатации. ВАИШ.461512.002РЭ. 209 с.

Рубцов Е. А. О применении закона aberrации в автоматическом зависимом наблюдении // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции, посвященной празднованию 100-летия конструкторского бюро "Туполев", 55-летия Иркутского филиала МГТУ ГА, 75-летия Иркутского авиационного технического колледжа, Иркутск, 13–14 октября 2022 года. Том 2, 2022. С. 101-106. EDN ICRLVT.

Руководство по авиационному наблюдению. Doc. 9924 AN/474. ICAO, 2020. 432 с.

Сертификационные требования (базис) к наземной станции автоматического зависимого наблюдения вещательного типа 1090ES [утв. 20.03.2018]. 42 с.

Estimating supersonic commercial aircraft market and resulting CO₂ emissions using public movement data / Colby J. Weit, Jiajie Wen, Turab A. Zaidi, Dimitri N. Mavris // CEAS Aeronautical Journal. 2021. № 12(1). Pp. 191-203. DOI: 10.1007/s13272-020-00486-3.

Guo D. PBN operation advantage analysis over conventional navigation / D. Guo, D. Huang // Aerospace Systems. 2021. № 4(2). Pp. 335-343. DOI: 10.1007/s42401-021-00084-z.

Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance - broadcast (ADS-B) and traffic information services - broadcast (TIS-B). RTCA DO-260B, 2009. 1410 p.

Present and Future of Air Navigation: PBN Operations and Supporting Technologies / Manuel López-Lago, José Serna, Rafael Casado, Aurelio Bermúdez // International Journal of Aeronautical and Space Sciences. 2020. № 21. Pp. 451-468. DOI: 10.1007/s42405-019-00216-y.

Sun Y. Conceptual design of sonic boom stealth supersonic transports / Y. Sun, H. Smith // CEAS Aeronautical Journal. 2022. № 13(1271). Pp. 419-432. DOI: 10.1007/s13272-021-00567-x.

Victor C. Chen. The Micro-Doppler Effect in Radar. Second Edition. Artech House, 2019. 342 p.

Wang J. ADS-B spoofing attack detection method based on LSTM / J. Wang, Y. Zou, J. Ding // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2020. № 160. Pp. 825-842. DOI: 10.1186/s13638-020-01756-8.

Zhou Z. Influence of Rotor Dynamic Scattering on Helicopter Radar Cross-Section / Z. Zhou, J. Huang // Sensors. 2020. № 20(7). P. 2097. DOI: 10.3390/s20072097.

References

ADS-B ground station NS-1A. Manual. RSHPI.461515.003M. 76 p. (In Russian)

Aeronautical Surveillance Manual. Doc. 9924 AN/474. ICAO, 2020. 432 p. (In Russian)

Certification requirements (Basis) for a ground station of automatic dependent surveillance of broadcast type 1090ES [agreed 20.03.2018], 2018. 42 p. (In Russian)

Colby J. Weit, Jiajie Wen, Turab A. Zaidi, Dimitri N. Mavris (2021). Estimating supersonic commercial aircraft market and resulting CO₂ emissions using public movement data. *CEAS Aeronautical Journal*. 12(1): 191-203. DOI: 10.1007/s13272-020-00486-3.

Guo D., Huang D. (2021). PBN operation advantage analysis over conventional navigation. *Aerospace Systems*. 4(2): Pp. 335-343. DOI: 10.1007/s42401-021-00084-z.

Kalintsev A. S., Rubtsov E. A. (2020). Method of detecting false intentionally generated ADS-B signals. *T-Comm: Telecommunications and transport*. 14(11): 4-13. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-11-4-13. (In Russian)

López-Lago Manuel, Serna José, Casado Rafael, Bermúdez Aurelio. (2020). Present and Future of Air Navigation: PBN Operations and Supporting Technologies. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 21: 451-468. DOI: 10.1007/s42405-019-00216-y.

Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance - broadcast (ADS-B) and traffic information services - broadcast (TIS-B). RTCA DO-260B, 2009. 1410 p.

- Plyasovskih A. P.* (2022). On the issue of aberration in the longitudinal motion of a material point relative to the observer. *Modern scientific research and innovation*. 2(130) Available at: URL: <https://web.sciencedirect.com/issues/2022/02/97670> (accessed 12 August 2022). (In Russian)
- Plyasovskih A. P.* (2022). The law of aberration and its applications in navigation and air traffic control: monograph. Moscow: Znanie-M, 2022. 71 p. ISBN 978-5-00187-223-8. (In Russian)
- Radar station «Lira-TVK». Manual. Part I. Description and operation of the radar. CIVR.462418.014M. 82 p. (In Russian)
- Rangefinder radio beacon DME 2000. Manual. VAISH.461512.002M. 209 p. (In Russian)
- Rubtsov E. A.* (2022). On the application of the aberration law in automatic dependent surveillance. *Actual Problems and Prospects of Civil Aviation Development: Proceedings of the XI International Scientific-Practical Conference dedicated to the 100th Anniversary of "Tupolev" Design Bureau, 55th Anniversary of Irkutsk Branch of MSTU GA, 75th Anniversary of Irkutsk Aviation Technical College*. – Irkutsk, October 13-14, 2022. Vol. 2, 2022. Pp. 101-106. (In Russian)
- Sun Y., Smith H.* (2022). Conceptual design of sonic boom stealth supersonic transports. *CEAS Aeronautical Journal*. 13: 419-432. DOI: 10.1007/s13272-021-00567-x.
- Transponder DME/NL 2700. Manual. AESF.461511.004-01M. 75 p. (In Russian)
- Victor C. Chen.* The Micro-Doppler Effect in Radar. Second Edition. Artech House, 2019. 342 p.
- Wang J., Zou Y., Ding J.* (2020). ADS-B spoofing attack detection method based on LSTM. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 160: 825-842. DOI: 10.1186/s13638-020-01756-8.
- Zhou Z., Huang J.* (2020). Influence of Rotor Dynamic Scattering on Helicopter Radar Cross-Section. *Sensors*. 20(7): 2097. DOI: 10.3390/s20072097.