

УДК 621.396.62

Анализ точностных характеристик дальномерных каналов радиотехнических систем ближней навигации¹

¹ Сеницын Е. А., ² Фридман Л. Б.

¹ НТЦ АО «Челябинский радиозавод “Полет”»

ул. Курчатова, 9, Санкт-Петербург, 194223, Российская Федерация
esinit@yandex.ru

² ООО «НПК “ТИМ”»

пр. Шаумяна, 4, корп. 1, лит. А, Санкт-Петербург, 195027, Российская Федерация
lenya2002@bk.ru

Получено: 5 мая 2020 г.

Отрецензировано: 10 сентября 2020 г.

Принято к публикации: 15 сентября 2020 г.

Аннотация: Приведены результаты оценки точностных характеристик каналов измерения дальности радиотехнических систем ближней навигации. Оценка выполнена с учетом особенностей аппаратной реализации бортовой и наземной (азимутально-дальномерный радиомаяк) аппаратуры радиотехнических систем ближней навигации, используемых при обработке радионавигационных сигналов алгоритмов, формата сигналов каналов измерения дальности, а также помеховой обстановки (синхронные и несинхронные внутрисистемные помехи). При этом рассмотрены влияние отражений от местных объектов, влияние внешних помех, искажений сигнала в бортовом приемнике и погрешности, вносимой аппаратурой наземного азимутально-дальномерного радиомаяка, в общую погрешность измерения дальности. С учетом указанных мешающих факторов определена общая погрешность определения дальности, а также составляющая погрешности, вносимая аппаратурой наземного азимутально-дальномерного радиомаяка.

Ключевые слова: радиотехническая система ближней навигации, запрос дальности, азимутально-дальномерный радиомаяк, многолучевое распространение сигналов, среднеквадратическая ошибка.

¹ Статья является расширенной версией доклада, представленного на 30-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2020 (Севастополь, РФ, 6—12 сентября 2020 г.).

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Фридман Л. Б., Сеницын Е. А. Анализ точностных характеристик дальномерных каналов радиотехнических систем ближней навигации // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 2. С. 181—189.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Фридман, Л. Б. Анализ точностных характеристик дальномерных каналов радиотехнических систем ближней навигации / Л. Б. Фридман, Е. А. Сеницын // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 181—189.

The analysis of precision of the range measuring channels for short-range navigation systems

E. A. Sinitsin¹ and L. B. Fridman²

¹STC JSC “Chelyabinsk radio plant Polet”

9, Kurchatova str., S-Petersburg, 194223, Russian Federation

esinit@yandex.ru

²LLC “NPK TIM”

4/1, Shaumyana Ave., S-Petersburg, 195027, Russian Federation

lenya2002@bk.ru

Received: May 5, 2020

Peer-reviewed: September 10, 2020

Accepted: September 15, 2020

Abstract: *The results of precision evaluation of the range measuring channels for short-range navigation systems are presented. The evaluation is performed taking into account the features of the hardware implementation of on-board and ground equipment of short-range navigation systems, the radio navigation signal processing algorithms, the format of the signals of the range measuring channels as well as interference environment. The influence of reflections from local objects is considered as well as signal distortions in on-board receiver and inaccuracies in the ground range-azimuth beacon. Taking into account these interfering factors, the overall error in the range finding is determined as well as the part of the error introduced by the equipment of the ground range-azimuth beacon.*

Keywords: *short-range navigation system, range request, range-azimuth beacon, multi-path propagation of signals, RMS error.*

For citation (IEEE): L. B. Fridman et al. “The analysis of precision of the range measuring channels for short-range navigation systems,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 181–189, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Канал дальности (КД) радиотехнической системы ближней навигации (РСБН) работает по принципу «запрос — ответ» и реализует импульсный (временной) метод определения дальности. Информация о дальности заключена в интервале времени между моментом излучения с летательного аппарата (ЛА) сигнала запроса дальности (ЗД) и моментом приема сигнала ответа дальности (ОД) с наземного азимутально-дальномерного радиомаяка (АДРМ):

$$t_D = 2D/c + t_{a.з.}, \quad (1)$$

где D — расстояние от ЛА до АДРМ; c — скорость распространения радиоволн; $t_{a.з.}$ — аппаратурная задержка сигнала.

В состав канала дальности входит бортовое оборудование — запросчик дальномера и наземный АДРМ, называемый также ответчиком дальномера. Одновременно с запуском измерителя времени включается передатчик запросчика и излучается кодированный сигнал ЗД на частоте f_{u1} . Принятый на АДРМ сигнал ЗД после приемника декодируется, задерживается на определенное время и вновь кодируется в устройстве обработки сигналов, после чего поступает на запуск передатчика. Последний излучает сигнал ОД на частоте f_{u2} . На борту ЛА сигнал ОД усиливается, декодируется в приемнике и используется для выключения (остановки) измерителя времени. Задержка сигнала в аппаратуре АДРМ ($t_{a.з.}$) поддерживается постоянной и учитывается при измерении.

Импульсный характер дальномерных сигналов позволяет АДРМ работать одновременно с несколькими запросчиками, т. е. способствует увеличению пропускной способности КД [1]. Применение различных частот и кодов для сигналов ЗД и ОД повышает помехоустойчивость запросчиков к сигналам ЗД других ЛА и предотвращает запуск АДРМ собственными сигналами, отраженными от местных объектов.

Сигналы КД представляют собой импульсы колоколообразной формы с длительностью 1,5 мкс (ЗД) и 1,25 мкс (ОД). Сигналы ЗД (ОД) состоят из трех (двух) импульсов, разделенных кодовыми интервалами длительностью в несколько десятков микросекунд. Кодирование служит для повышения помехоустойчивости КД и облегчения опознавания радиомаяков. Кодовые интервалы различны для разных радиомаяков, что в сочетании с разными несущими частотами используется для выбора нужного радиомаяка.

Пары импульсов повторяются со средней частотой F_{Π} , которая выбирается из условия однозначности отсчета дальности $F_{\Pi} \leq c/(2R_{\max})$, где R_{\max} — дальность действия КД. Следует отметить, что увеличение F_{Π} способствует повышению вероятности правильного обнаружения сигнала, но снижает пропускную способность КД. Поэтому при переходе в режим сопровождения по дальности частота F_{Π} уменьшается в 5—10 раз.

Следует отметить, что сигналы ЗД и ОД всегда отличаются друг от друга несущими частотами и кодовыми интервалами. Различия кодовых интервалов и несущих частот сигналов ЗД и ОД позволяют повысить помехоустойчивость запросчиков к сигналам запросов других ЛА и предотвратить запуск АДРМ собственными сигналами, отраженными от окружающих его объектов.

2. Факторы, влияющие на точность канала измерения дальности

Отличительной особенностью КД является работа запросчика и ответчика в специфической помеховой обстановке, когда существуют внутрисистемные синхронные и несинхронные помехи.

Синхронные помехи создаются сигналами ЗД, отраженными от окружающих АДРМ объектов и вызывающими повторный (ложный) запуск этого радиомаяка. Для исключения синхронных помех ответчик запирается на некоторое защитное время $t_{защ}$ после приема первого (пришедшего по кратчайшему пути) импульса запроса. Однако при этом возможно уменьшение числа ответов другим ЛА, чьи запросные сигналы попадают на интервал $t_{защ}$. Поэтому запросчики всегда рассчитываются на число ответов $N_{отв}$, меньшее числа запросов $N_{зан}$ (коэффициент ответов $K_{отв} = N_{отв}/N_{зан} < 1$).

Несинхронные внутрисистемные помехи создаются, главным образом, сигналами ОД другим («чужим») ЛА. Для борьбы с несинхронными помехами, т. е. для выделения «своего» ответного сигнала, применяют нестабилизированные генераторы, задающие период повторения сигналов ЗД, и частота повторения F_{Π} излучаемых запросных сигналов изменяется случайным образом относительно определенного среднего значения F_{Π} . При этом «свой» ответный сигнал оказывается задержанным относи-

тельно ЗД на время t_R , которое можно считать постоянным на интервале в несколько периодов повторения T_{II} сигналов ЗД, а «чужие» сигналы ОД представляют собой несинхронные помехи, избавиться от которых можно с помощью стробирования приемного тракта (или его части) по времени.

Использование ответчика способствует увеличению отношения мощностей сигнала и шума на входе измерителя времени запросчика. Поэтому преобладающее влияние на точность дальнометрии оказывает не флуктуационная, а аппаратурная погрешность. Так как измерители времени реализуются в цифровом варианте, основной составляющей этой погрешности может быть дискретность отсчета. Для ее уменьшения используют высокие (порядка нескольких мегагерц) частоты следования счетных импульсов.

Точность измерения дальности зависит главным образом от тех факторов, которые приводят к искажению временного положения переднего фронта ОД, так как измерение интервала времени производят обычно по передним фронтам импульсов. К числу таких факторов можно отнести отражения от местных объектов, помехи, принимаемые одновременно с полезным сигналом, и искажения сигнала в бортовом приемнике.

Влиянием отражений от местных объектов на бортовое оборудование можно пренебречь, так как передний фронт полезного импульса всегда соответствует кратчайшему расстоянию между АДРМ и ЛА [2]. Все отраженные сигналы проходят больший путь и поэтому могут исказить только огибающую и задний фронт импульса. Исключение составляют сигналы ЗД, отраженные от местных объектов. Эти сигналы могут вызвать повторный запуск ответчика и появление мощных ОД на борту самолета, которые синхронны с импульсами ЗД. Для исключения этого явления в АДРМ вслед за принятым ЗД приемник запирается на защитное время $t_{защ}$. Запирание необходимо также для восстановления чувствительности приемника.

Влияние внешних помех на канал дальности мало из-за применяемого импульсного кодирования.

Источником погрешностей также является измеритель времени, аппаратурные погрешности которого оказывают влияние на точность измерения дальности. Кроме того, на точность измерения влияет задержка сигнала в сравнительно узкополосных усилителях приемного тракта запросчика, которая зависит от уровня усиливаемого сигнала, нестабильности температуры и уходов несущей частоты.

3. Точность измерения дальности на борту ЛА

В канале дальности РСБН используются цифровые следящие импульсные радиодальномеры (РД), измеряющие время запаздывания сигнала ОД относительно сигнала ЗД по второму импульсу пары импульсов, разделенных кодовым интервалом (совмещение второго и первого импульсов ОД выполняется в декодирующем устройстве бортовой аппаратуры). При постоянстве и известном значении задержки сигнала в АДРМ основное уравнение рассматриваемого дальномера, согласно (1), имеет вид

$$D = 0,5ct_R = Mt_R, \quad (2)$$

где $t_R = t_D - t_{a.з.}$,

Из (2) следует, что масштабный коэффициент M не зависит от проектировщика системы, и точность РД определяется только точностью измерения t_R и степенью стабильности скорости распространения радиоволн.

Из (2) получаем среднеквадратичную погрешность (СКП) измерения дальности с помощью РД [3]:

$$\sigma_R = D \left[\left(\frac{\sigma_M}{M} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{t_R} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где σ_M — составляющая СКП, определяемая нестабильностью скорости распространения радиоволн;

σ_t — составляющая СКП, определяемая аппаратурной погрешностью измерения t_R .

Анализ уравнения (3) показывает, что σ_M , даже в наихудших условиях, когда $(\sigma_c/c) = 10^{-4}$ (σ_c — среднеквадратичное отклонение скорости распространения радиоволн), а $D = 600$ км (высота полета ЛА — около 20 км), составляет примерно 60 м, что позволяет в обычных условиях использования РСБН не учитывать нестабильность скорости распространения радиоволн и считать, что основной вклад в бюджет точности КД вносит аппаратурная погрешность измерения времени задержки t_R сигнала ОД.

В цифровом РД к указанным составляющим добавляется погрешность дискретности отсчета $\sigma_{ДС} = (0,5cT_{СЧ})/\sqrt{12}$, зависящая от периода повторения счетных импульсов $T_{СЧ}$ [3].

Реальная точность КД характеризуется СКП $\sigma_R \approx 100$ м.

4. Погрешность, вносимая АДРМ в измерение дальности на борту ЛА

Оценим погрешность, вносимую АДРМ в измерение дальности на борту ЛА. В отличие от канала измерения азимута, канал измерения дальности с точки зрения погрешности измерения может быть разделен на две независимые составляющие: наземную и бортовую.

Так как по условиям задачи АДРМ должен работать с уже существующим бортовым оборудованием, достаточно оценить только «вклад» АДРМ в общую погрешность.

Погрешность, вносимая аппаратурой АДРМ в общую погрешность измерения дальности, складывается из следующих основных частей

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2},$$

где

σ_1 — ошибка определения временного положения запросного сигнала;

σ_2 — ошибка формирования временной задержки ответного сигнала;

σ_3 — ошибки кодирующе-декодирующих устройств и формирователей ответного сигнала.

Момент фиксации видеоимпульса в случае простой фиксации по переднему фронту изменяется на величину длительности фронта, составляющую в формате системы РСБН 0,3—0,4 мкс [3]. Следовательно, при использовании простого фиксатора по переднему фронту в любом случае ошибка не превысит этой величины, т. е. диапазон изменения момента фиксации дальномерного канала не превысит 60 м. Если юстировка сделана ориентируясь на сигналы, мощность которых занимает среднее положение между минимальным и максимальным значениями, ошибка фиксации будет меняться в пределах ± 30 м, т. е. $\sigma_1 = 10$ м.

Максимальная ошибка временной задержки, возникающая за счет нестабильности кварцевого генератора (задержка формируется цифровым способом)

$$\Delta_2 = \Delta f \cdot \frac{T_i \cdot c}{2},$$

где Δf — относительная нестабильность кварцевого генератора;

$T_1 = 61 \cdot 10^{-6}$ с — задержка ответного сигнала в направленном режиме,

$T_2 = 183,4 \cdot 10^{-6}$ с — задержка ответного сигнала во всенаправленном режиме.

Соответственно, среднеквадратическая ошибка для направленного и всенаправленного режимов $\sigma_{2н} = 0,03$ м, $\sigma_{2г} = 0,1$ м.

Наконец, при частоте тактового генератора в 8 МГц максимальная ошибка, возникающая из-за наличия временной дискретности в работе дешифратора, составит $\pm 9,4$ м, следовательно, $\sigma_3 \cong 3,1$ м.

$$\text{Отсюда } \sigma_{н,г} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \cong 10 \text{ м.}$$

5. Заключение

Точность дальномерного канала РСБН характеризуется среднеквадратичной погрешностью, составляющей порядка 100 м. При этом на точность измерения дальности влияет задержка сигнала в усилителях приемного тракта запросчика (бортового оборудования летательного аппарата), которая зависит от уровня усиливаемого сигнала, нестабильности температуры и уходов несущей частоты. Кроме того, источником погрешностей является измеритель времени, аппаратурные погрешности которого оказывают влияние на точность измерения дальности.

В то же время, влиянием отражений от местных объектов на бортовое оборудование можно пренебречь, а влияние внешних помех мало из-за применяемого импульсного кодирования. Влияние нестабильности скорости распространения радиоволн также пренебрежимо мало.

Погрешность, вносимая аппаратурой АДРМ в общую погрешность измерения дальности, характеризуется среднеквадратичной погрешностью, составляющей около 10 м. При этом величина погрешности, вносимой аппаратурой АДРМ, определяется ошибкой определения временного положения запросного сигнала (влияние остальных факторов пренебрежимо мало). Момент фиксации видеоимпульса (в случае простой фиксации по переднему фронту) изменяется на величину длительности фронта, составляющую в формате системы РСБН 0,3—0,4 мкс. Таким образом, величина погрешности, вносимой аппаратурой АДРМ, определяется длительностью фронта импульсов канала дальности.

Список литературы

- 1 Сосновский А. А., Хаймович И. А. Авиационная радионавигация : справочник. М. : Транспорт, 1980. 255 с.
- 2 Фридман Л. Б., Ершов Г. А., Недобежкин М. И., Сеницын Е. А. Повышение помехоустойчивости дальномерного и информационного радиоканалов системы ПРМГ при действии внутрисистемных помех. В сб. : 28-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» — КрыМиКо'2018 (Севастополь, 9—15 сент. 2018 г.). 2018. С. 398—402.
- 3 Бакулев П. А., Сосновский А. А. Радионавигационные системы. М. : Радиотехника, 2005. 224 с.

Информация об авторах

Фридман Леонид Борисович, д. т. н., главный специалист ООО «НПК “ТИМ”», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Синицын Евгений Александрович, д. т. н., проф., заместитель начальника Научно-технического центра АО «Челябинский радиозавод “Полет”», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Information about the authors

Leonid B. Fridman, head specialist of LLC “NPK TIM”, doctor of science, Saint-Petersburg, Russian Federation.

Eugeniy A. Sinitin, deputy head of the scientific and technical center of JSC “Chelyabinsk radio plant Polet”, doctor of science, professor, Sannt-Petersburg, Russian Federation.