Математическая модель ошибки измерения траекторной скорости по доплеровскому сдвигу частоты

Д.А. Медеев, А.Л. Переверзев

Национальный исследовательский университет МИЭТ, г. Москва, medeev@olvs.miee.ru

Аннотация — В статье рассмотрена математическая модель интервального измерения траекторной скорости доплеровским радиолокационным устройством. Проведен ее анализ и определены основные параметры и характеристики, влияющие на точность. Выявлена зависимость относительных ошибок при различных измерения. Построена наклонных лальностях аддитивная математическая модель относительной ошибки измерения траекторной скорости. Проверена корректность модели на экспериментальных данных. получения доплеровского сдвига Лля частоты предложено радиолокационное устройство ближнего действия с двойным преобразованием частоты, которое обладает повышенной чувствительностью по сравнению с устройством с прямым преобразованием.

Ключевые слова — доплеровский сдвиг частоты, РЛУ, измерение траекторной скорости, математическая модель, относительная ошибка.

I. Введение

В настоящее время доплеровские измерители скорости нашли широкое применение в системах мониторинга и контроля параметров движения объектов, в информационно-управляющих системах (ИУС) и других системах различного назначения. Тенденции развития современных систем и комплексов накладывают ограничения по размещению, объему аппаратуры, быстродействию и точности измерений [1].

обеспечения эффективной Для реализации аппаратно-программных средств измерителя, радиолокационное устройство (РЛУ) и цифровое вычислительное устройство (ЦВУ) должно быть исполнено в едином датчике, который является частью ИУС, где РЛУ неотъемлемой является сенсором для получения информационного сигнала, содержащего доплеровский сдвиг частоты [2].

Результатом прямых измерений доплеровским РЛУ является радиальная скорость объекта [3]. Траекторная скорость является результатом вычислений с учетом угла между РЛУ и траекторией движения объекта. Ключевыми особенностями в обеспечении точности измерений является выбор длительности интервала измерения и топологической привязки РЛУ относительно движущегося объекта. При проведении измерений в ближней зоне РЛУ (до 10 м), необходимо максимально точно определять радиальную дальность (наклонную дальность) до объекта. Для обеспечения быстродействия и повышенной точности измерений скорости требуется проанализировать математическую модель интервального измерения траекторной скорости доплеровским методом [4] и на основании нее разработать модель относительных ошибок.

Для решения поставленной научно-практической задачи проведено исследование влияния различных параметров и характеристик на точность измерения траекторной скорости доплеровским методом. На основании полученных результатов предложена аддитивная математическая модель относительной ошибки вычислений и проверена ее корректность.

II. ПРИНЦИП ПОЛУЧЕНИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ

Для получения доплеровского сдвига частоты, обусловленной движением за наблюдаемым объектом, в настоящей работе рассматривается РЛУ ближнего действия (наклонная дальность измерений до 10 м) с двойным преобразованием частоты, которое обладает повышенной чувствительностью радиоприемного тракта по сравнению с прямым преобразованием за счет снижения фазового шума на промежуточной частоте.

Структурная схема устройства формирования и обработки высокочастотного сигнала РЛУ приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема устройства формирования и обработки высокочастотного сигнала РЛУ

Генератор первой промежуточной частоты (ГППЧ) вырабатывает сигнал

$$u_{\rm g}(t) = A_{\rm g}(t)\cos 2\pi f_{\rm l}t,$$

где $A_{\rm g}$ – амплитуда сигнала, f_1 – частота сигнала, t – время. Сигнал с ГППЧ смешивается в формирователе одной боковой полосы (ФОБП) с сигналом генератора второй промежуточной частоты (ГВПЧ), имеющим частоту f_2 и подается на усилитель мощности (УМ). Тогда зондирующий сигнал $u_{\rm i}$, излучаемый передающей антенной $A_{\rm i}$, можно записать как

$$u_{i}(t) = A_{i}(t)\cos[2\pi(f_{1}+f_{2})t].$$

Отраженный от движущегося объекта эхо-сигнал u_r , принимаемый антенной A_2 , имеет вид

$$u_{\rm r}(t) = A_{\rm r}(t) \cos[2\pi(f_1 + f_2) \cdot (t - \tau)], \qquad (1)$$

где A_r – амплитуда принятого сигнала, τ – задержка принятого сигнала от движущегося объекта, находящегося на расстоянии R_i и движущегося с радиальной скоростью V_r

$$\tau = \frac{2(R_{\rm i} \pm V_{\rm r} \cdot t)}{c},$$

где с – скорость света в открытом пространстве.

Из эхо-сигнала (1), после прохождения через радиоприемник в котором имеется малошумящий усилитель высокой частоты (МШУ ВЧ), (ПВЧ), фильтр преобразователь высокой частоты промежуточной частоты (ФПЧ), малошумящий усилитель промежуточной частоты (МШУ ПЧ) и преобразователь промежуточной частоты (ППЧ), на фильтре доплеровской частоты (ФДЧ) выделяется частотный сдвиг

$$f_{\rm d} = \frac{2V_{\rm r}(f_1 + f_2)}{c},$$

который характеризует радиальную скорость перемещения объекта измерений.

III. Определение траекторной скорости

Так как в качестве сенсора для получения информационного сигнала используется доплеровский измеритель, то он обеспечивает только измерение радиальной скорости

$$V_{\rm r_i} = \frac{c}{2f_0 T_{\rm d_i}},$$
 (2)

где $f_0 = f_1 + f_2$ – частота зондирующего сигнала, T_{d_i} – период частоты доплеровского сдвига.

Радиальное расстояние, пройденное объектом за время измерений T_i , определяется как

$$\Delta R = V_{r_{\rm i}} T_{\rm i} = \frac{c T_{\rm i}}{2 f_0 T_{\rm d_{\rm i}}}.$$
(3)

Так как временной интервал измерения T_i выбирается равным целому числу N периодов доплеровского сигнала T_{d_i} , т.е. $T_i = NT_{d_i}$, то

$$\Delta R = \frac{cN}{2f_0} = 0,5\lambda N,\tag{4}$$

где λ – длина волны зондирующего сигнала.

вычислении траекторной При скорости по доплеровскому сдвигу частоты требуется учитывать угол между траекторией движения объекта и РЛУ, с поступает которого информационный сигнал. Размещение РЛУ относительно траектории движения показано на рис. 2, где Н – расстояние от РЛУ до траектории движения объекта, D_i – прямая дальность от РЛУ до объекта измерений, ΔD_i – пройденный путь за время измерений, R_i – радиальное расстояние от РЛУ до объекта измерения, а, – угол между РЛУ и объектом измерений.



Рис. 2. Размещение РЛУ относительно траектории движения объекта измерения

Траекторная скорость V_{t_i} вычисляется из величины интервала ΔD_i и времени измерения T_i , за которое объект проходит это расстояние

$$V_{t_i} = \frac{\Delta D_i}{T_i}.$$
 (5)

Из рис. 2 следует, что пройденный путь за временной интервал измерения выражается как

$$\Delta D_{\rm i} = \sqrt{\Delta R^2 + 2R_{\rm i-1}\Delta R + D_{\rm i-1}^2} - D_{\rm i-1},\tag{6}$$

где

$$R_{\rm i} = R_0 + i \cdot \Delta R, \tag{7}$$

$$D_{\rm i} = \sqrt{\left(R_0 + i \cdot \Delta R\right)^2 - H^2},\tag{8}$$

где R_0 – известное радиальное расстояние в начале измерения траекторной скорости, i = 0, 1, 2, ..., n – номер измеряемого интервала.

С учетом (2) - (8) интервальную тракторную скорость можно представить как

$$V_{t_{i}} = \frac{\sqrt{(0,5\lambda N)^{2} + R_{i-1}\lambda N + D_{i-1}^{2}} - D_{i-1}}{T_{i}}.$$
 (9)

Таким образом, чтобы вычислить траекторную скорость V_{t_i} на некотором интервале необходимо:

- измерить временной интервал T_i, за который укладывается целое число N периодов доплеровской частоты;
- определить геометрические расстояния наклонной дальности до начала измерений R₀ и расстояние от РЛУ до траектории движения объекта измерений H;
- знать длину волны зондирующего сигнала λ.

IV. Относительные ошибки определения траекторной скорости

Для доплеровских измерителей траекторной скорости главными эксплуатационными характеристиками являются дальность действия и точность вычисления траекторной скорости.

Дальность действия определяется наклонной дальностью и выражается из основного уравнения радиолокации [5]

$$R_{\rm i} = \sqrt[4]{12, 6\frac{P_{\rm t}G^2\lambda^2\sigma}{BKL\rho}},\qquad(10)$$

где $P_{\rm t}$ — мощность радиопередатчика, G — коэффициент усиления антенн, σ — эффективная площадь рассеяния объекта измерений, B — полоса пропускания, K — коэффициент шума, L — коэффициент потерь, ρ — отношение сигнал/шум.

Проанализировав выражения (9) и (10), можно сделать вывод о том, что на точность определения траекторной скорости влияют следующие характеристики:

- длина волны зондирующего сигнала;
- шум приемника;
- угол α_i и геометрическое расстояние наклонной дальности до начала измерений R₀;
- длительность временного интервала измерения *T*_i.

А. Нестабильность длины волны зондирующего сигнала

При использовании синтезаторов частот в формировании зондирующего сигнала, нестабильность длины волны несущей частоты определяется параметрами кварцевого резонатора, который является опорным генератором для ГППЧ и ГВПЧ. Дрейф частоты кварцевого резонатора обусловлен изменением температуры в некотором рабочем интервале. Для большинства кварцевых резонаторов с малым значением температурного коэффициента частоты, нестабильность составляет (50...100)·10⁻⁴ и только для некоторых резонаторов может не превышать (5...40)·10⁻⁶ [6].

Атмосферное влияние на скорость света в воздухе и коэффициент преломления воздуха можно не принимать в расчет, так как измерения предполагается проводить в ближней зоне РЛУ на расстоянии до 10 м.

В. Шум при приеме доплеровского сигнала

В радиоприемнике измерителя на сигнал с доплеровским сдвигом частоты накладывается шум, который определяет относительную ошибку, связанную с искажениями приема. Из [7] известно, что минимальная дисперсия оценки частотного сдвига соответствует

$$\sigma_{_{MUH}}^{2}(\omega_{d}) = \frac{1}{\frac{1}{N_{0}} \int_{-\infty}^{+\infty} t^{2} \left|A_{d}\right|^{2} dt},$$
(11)

где N_0 – спектральная плотность белого шума, $A_{\rm d}$ – амплитуда сигнала.

Проинтегрировав выражения (11) в энергетическом центре функции $A(t, \omega_d) = A_d(t)e^{j\omega_d t}$ от $-\frac{T}{2}$ до $+\frac{T}{2}$ при $A_d(t) = const$ можно определить относительную ошибку измерения доплеровского сдвига частоты как

$$\delta f_{\rm d} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi N \sqrt{2S / N_0}},\tag{12}$$

где $S / N_0 = \rho$ – отношение сигнал/шум принятого сигнала.

На рис. З представлен график зависимости относительных ошибок определения доплеровского сдвига частоты от наклонной дальности R_i при различных отношениях сигнал/шум и выбранном числе периодов доплеровского сигнала N = 40.



Рис. 3. Относительная ошибка определения доплеровского сдвига частоты

Так как отношение сигнал/шум обратно пропорционально расстоянию, на котором проводятся измерения как

$$\frac{S}{N_0} = 12, 6 \frac{P_{\rm t} G^2 \lambda^2 \sigma}{R_{\rm t}^4 B K L},$$

то ошибка при изменении дальности пропорциональна R_{\cdot}^{2} .

С. Погрешности определения угла и наклонной дальности

Вычисление траекторной скорости под некоторым углом обзора вызывает ошибку, связанную с погрешностью определения этого угла, так как траекторная и радиальная скорость связаны соотношением

$$V_{t_i} = \frac{V_{t_i}}{\cos \alpha_i}.$$
 (13)

Зависимость относительной ошибки измерения скорости доплеровской РЛС от погрешности определения угла $\Delta \alpha_i$ между траекторией движения объекта и направлением измерения при различных углах приведена в работе [8].

Так как скорость изменения угла внутри измерительных интервалов изменяется, то относительная ошибка, связанная с погрешностью определения угла, определяется с помощью дифференцирования соотношения (13) как $\partial V_{r_i} / \partial \alpha_i$. Она имеет вид

$$\delta \alpha_{i} = \tan \alpha_{i} \cdot \Delta \alpha_{i}. \tag{14}$$

Из рис. 2 следует, что относительную ошибку (14) можно представить как

$$\delta \alpha_{i} = \frac{H}{D_{i}} \cdot \Delta \alpha_{i} = \frac{H}{\sqrt{\left(R_{0} + i \cdot \Delta R\right)^{2} - H^{2}}} \cdot \Delta \alpha_{i}.$$
 (15)

Расстояние Н в процессе измерения траекторной скорости не меняется И предопределено конструктивностями особенностями размещения РЛУ, например 0,3 м. В этом случае в ближней зоне доплеровского измерителя, где R_i находится в пределах от 1 до 10 м, угол α, будет меняется в диапазоне от 0,3 до 0,03 радиан (от 17° до 1,7°). Графическая зависимость относительных ошибок определения угла $\delta \alpha_{i}$ (15) от наклонной дальности при $10^{-6} \le \Delta \alpha \le 10^{-1}$ представлена на рис. 4. При погрешности определения $\Delta \alpha_{i} \leq 10^{-2}$, относительная ошибка, связанная с определением угла, не превышает $\delta \alpha_i \leq 5 \cdot 10^{-3}$.

Угол наблюдения по наклонной дальности определяется выражением

$$\alpha_{\rm i} = \arcsin \frac{H}{R_{\rm i}}.$$
 (16)



Рис. 4. Относительная ошибка определения угла

Таким образом, погрешность определения угла от наклонной дальности определяется дифференцированием выражения (16) как $\partial \alpha_i / \partial R_i$, полагая, что значение *H* в процессе измерения не изменяется

$$\Delta \alpha_{\rm i} = \frac{H}{R_{\rm i} \cdot \sqrt{R_{\rm i}^2 - H^2}} \cdot \Delta R, \qquad (17)$$

где ΔR – радиальное расстояние, пройденное объектом за временной интервал T_i (4).

Из (17) следует, что погрешность определения угла, при постоянном числе периодов доплеровского сигнала *N*, уменьшается с увеличением наклонной дальности.

D. Ошибки измерения временного интервала

При обработке доплеровского сигнала во временной области [9] в процессе вычисления траекторной скорости временной интервал измерения T_i (рис. 5) формируется последовательностью счётных импульсов с выбранной частотой дискретизации как

$$T_{\rm i} = T_{\rm c} \cdot N_{\rm c_i}, \qquad (18)$$

где $T_{\rm c} = 1/f_{\rm c}$ – период поступления счетных импульсов, $N_{\rm c}$ – код подсчета временного интервала.



Рис. 5. Формирование измерительного интервала

Для реализации алгоритма измерения временного интервала, в аппаратной части ЦВУ используется компаратор, который настроен на нулевой порог формировании сравнения И используется В измерительного интервала по информационному сигналу. Началом формирования измерительного интервала считается момент времени перехода сигнала с доплеровским сдвигом частоты через нулевой уровень. Окончанием измерительного интервала считается момент поступления переднего фронта импульса N+1 (рис. 5). В результате двоичный код временного интервала измерения формируется на выходах п-разрядного двоичного счётчика тактовыми импульсами частотой дискретизации f_c , поступающими на счётчик в течение измерительного интервала T_i . На основании значения длительности измерительного интервала, вычисляется траекторная скорость объекта по (9).

Таким образом, принимая во внимание (9) и (18), для вычисления относительной ошибки, связанной с погрешностью определения длительности измерительного интервала, траекторную скорость можно выразить как

$$V_{t_i} = \frac{\Delta D_i}{T_c \cdot N_{c_i}}.$$
 (19)

Так как $T_{\rm c} = 1/f_{\rm c}$, то относительная ошибка, связанная с частотой дискретизации, будет зависеть от дрейфа частоты опорного кварцевого резонатора $\delta f_{\rm c}$.

Относительная ошибка, связанная с определением длины кода временного интервала, выражается как

$$\delta N_{\rm c_i} = \frac{\Delta N_{\rm c}}{N_{\rm c_i}} = \frac{1}{N_{\rm c_i}},\tag{20}$$

так как ошибка вычисления измерительного интервала не может превышать одного импульса частоты дискретизации f_c .

На основании (19), (20) суммарную относительную ошибку измерения временного интервала можно представить как

$$\delta T_{\rm i} = \delta f_{\rm c} + \delta N_{\rm c_i}. \tag{21}$$

Следует отметить, что при вычислении минимального значения скорости из заданного диапазона скоростей, относительная ошибка будет меньше, чем при вычислении максимального значения скорости этого диапазона. Поэтому для определения максимально возможной ошибки в диапазоне измеряемых скоростей, следует учитывать код подсчета временного интервала для максимально возможной скорости.

V. Аддитивная математическая модель относительной ошибки измерения траекторной скорости

На основании проведенного выше исследования можно сделать вывод, что ошибки при измерении траекторной скорости будут зависеть от выбора опорного кварцевого резонатора (генератора) для синтезирования несущей частоты и частоты дискретизации, энергетических характеристик РЛУ, угла α_i , при котором проходит измерение траекторной

скорости и выбранного способа обработки информационного сигнала.

Таким образом, принимая во внимание (12), (15) и (21), аддитивную математическую модель относительной ошибки измерения траекторной скорости можно представить как

$$\delta V_{\rm t} = \delta f_{\rm ref} + \delta f_{\rm d} + \delta \alpha_{\rm i} + \delta f_{\rm c} + \delta N_{\rm c}.$$

VI. ПРОВЕРКА КОРРЕКТНОСТИ МОДЕЛИ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для измерения траекторной скорости с высокой точностью максимальную ошибку, связанную с нестабильностью частоты зондирующего сигнала, примем $\delta f_{\rm ref} \leq 10^{-4}$. Такую точность обеспечивает большинство современных кварцевых резонаторов широкого применения. Так как зондирующий сигнал формируется путем смешивания первой промежуточной частоты и второй промежуточной часты, то максимальная ошибка будет составлять $\delta f_{\rm ref} \leq 2 \cdot 10^{-4}$.

При расчете ошибки, связанной с наличием собственных шумов в приемном тракте $\delta f_{\rm d}$, доплеровский анализировался сигнал (рис. 6), полученный в ходе экспериментальных исследований. Осциллограмма сигнала разбита на интервалы, соответствующие измерительной базе 1 м, с N периодами доплеровской частоты. При оценке величины отношения сигнал/шум измерено минимальное значение амплитуды на принятом интервале. В результате чего, вычисляется максимальная величина ошибки, связанная как с удалением объекта измерений, так и с наличием амплитудной модуляции в сигнале. Как видно из осциллограммы, измерения на расстоянии R_i до 2 метров при величине интервала 1 м не представляются возможными из-за отсутствия сигнала на некотором участке первого измерительного интервала и сильной амплитудной модуляции на втором измерительном интервале. Таким образом, ошибка, связанная с наличием собственных шумов, минимальна на третьем измерительном интервале и составляет $\delta f_{d_2} = 9,4 \cdot 10^{-4}$.

Относительная ошибка, связанная с погрешностью определения угла $\delta \alpha_i$ уменьшается по мере увеличения наклонной дальности R_i . При вычислении ошибки данного типа следует понимать, что минимальной наклонной дальности R_i , соответствует максимальная ошибка. Так например, при вычислении относительной ошибки $\delta \alpha_i$ на интервале от 3 до 4 метров, в (15) следует использовать значение $R_i = 3$ м, тем самым определив максимальное значение ошибки для этого интервала.



Рис. 6. Осциллограмма сигнала с доплеровским смещением частоты

Ошибка, связанная с нестабильностью частоты дискретизации, не превышает $\delta f_c \leq 10^{-4}$, так как кварцевый резонатор формирования опорного тактового сигнала АЦП используется тот же самый, что и для формирования зондирующего сигнала. Для выбранной частоты дискретизации $f_c = 2$ МГц, относительная ошибка подсчета импульсов на счетчике, не будет превышать $\delta N_{c_i} \leq 4, 6 \cdot 10^{-4}$ при текущем доплеровском смещении частоты.

Относительные ошибки измерения траекторной скорости δV_{t_i} от наклонной дальности R_i , приведены в табл. 1.

Таблица 1

Ошибки измерения траекторной скорости $\delta V_{t_{t}}$

<i>R</i> _i , м	$\delta f_{ m ref}$	$\delta f_{\mathrm{d_i}}$	$\delta \alpha_i$	$\delta T_{ m i}$	$\delta V_{\mathrm{t_i}}$
1	2.10-4	-	-	5,6.10-4	-
2	$2 \cdot 10^{-4}$	13,3.10-4	25.10-4	5,6.10-4	45,9·10 ⁻⁴
3	$2 \cdot 10^{-4}$	9,4.10-4	2,9.10-4	5,6.10-4	19,9·10 ⁻⁴
4	$2 \cdot 10^{-4}$	11,5.10-4	8,5·10 ⁻⁵	5,6.10-4	20,0.10-4
5	$2 \cdot 10^{-4}$	13,3.10-4	3,6.10-5	5,6.10-4	21,3.10-4
6	2.10-4	16,3.10-4	1,8.10-5	5,6.10-4	24,1.10-4
7	$2 \cdot 10^{-4}$	22,9·10 ⁻⁴	1,1.10-5	5,6.10-4	30,6.10-4
8	$2 \cdot 10^{-4}$	25,7.10-4	6,7.10-6	5,6.10-4	33,4.10-4
9	$2 \cdot 10^{-4}$	27,6.10-4	4,5.10-6	5,6.10-4	35,2.10-4
10	2.10-4	28,1.10-4	3,1.10-6	5,6.10-4	35,7.10-4

VII. Выводы

Таким образом, в работе приведена математическая модель интервального измерения траекторной ней разработана скорости и по аддитивная математическая модель относительной ошибки измерения. Результаты проведенного исследования показали, что ошибка, связанная с нестабильностью длины волны зондирующего сигнала не является преобладающей. Наибольший вклад в суммарную ошибку вносит величина отношения сигнал/шум. При небольшой дальности действия РЛУ, размещать устройство следует ближе к оси движения объекта, для уменьшения погрешности определения угла.

Полученные результаты исследования позволяют оптимизировать схемотехнические и алгоритмические решения в доплеровских устройствах измерения траекторной скорости, обеспечивая требуемую точность и быстродействие.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ливенцев Е. В., Переверзев А.Л., Примаков Е.В. [и др.] Цифровой измеритель частоты с повышенной точностью и быстродействием для доплеровского измерителя скорости // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). 2018. № 2. С. 156-161.
- [2] Медеев Д.А. Определение доплеровского смещения малоразмерных высокоскоростных объектов // Тезисы докладов 28-ой Всероссийской межвузовской научнотехнической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика». Москва, Зеленоград, Россия. 29-30 апреля 2021 г. С. 132.
- [3] Станция баллистическая «ЛУЧ-83» // Техническое описание АШВ.1.400.003.ТО. Нижний Тагил, Институт испытания металлов, 1984. 110 с.
- [4] Патент № 2421752 С1 Российская Федерация, МПК G01S 13/58. Устройство для измерения траекторной скорости объекта : № 2009136646/09 : заявл. 06.10.2009 : опубл. 20.06.2011 / Е. И. Макушев ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный институт электронной техники (технический университет) (МИЭТ), Общество с ограниченной ответственностью "Технология".
- [5] Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2004, 320 с.
- [6] Хоменко И.В. Кварцевые резонаторы и генераторы: учеб. пособие / И. В. Хоменко, А. В. Косых; Минобрнауки России, ОмГТУ. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2018. 160 с.
- [7] Современная радиолокация. Пер. с англ. / Под ред. Ю.Б. Кобзарева. М.: Сов. радио, 1969. 704 с.
- [8] Соловьев В.А., Ярощук С.С., Федотов А.В., Конохов В.Е. Сравнительный анализ лазерного и радиолокационного методов измерения начальной скорости снаряда // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 9. С. 168-175.
- [9] Медеев Д.А. Цифровая обработка информационного сигнала с доплеровской РЛС во временной области // Труды 24-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применения – DSPA-2022». Москва, Россия. 30 марта-1 апреля 2022 г. С. 183-187.

Mathematical Model of the Trajectory Velocity Measurement Error by Doppler Frequency Shift

D.A. Medeev, A.L. Pereverzev

National Research University of Electronic Technology, Moscow, medeev@olvs.miee.ru

Abstract — Trends in the development of modern systems impose the constraints on the placement, volume of equipment, velocity and accuracy of the measurements [1].

The paper describes a near-field radar device, which is the sensor of an information signal containing Doppler frequency shift [2]. Structure of the device for the generation and processing of high-frequency signal with double frequency conversion contains: the first intermediate frequency generator, the second intermediate frequency generator, the one sideband shaper, the low noise high frequency amplifier, the high frequency converter, the low noise intermediate frequency amplifier, the intermediate frequency converter and the Doppler frequency filter.

The result of the direct measurements by Doppler radar is the radial velocity of the object [3]. Based on the Doppler effect, an interval mathematical model of trajectory velocity measurement is considered [4], in which the distance traveled is determined by the radial distance traveled during the measurement time, and then the trajectory velocity of the object is calculated from these data. The paper analyzes the model of interval velocity measurement and identifies the main parameters and characteristics affecting the accuracy. These include: wavelength of the probing signal, receiver noise, observation angle, and the duration of the measurement time interval [5-9].

The types of the relative errors are determined and their influence on the accuracy of the trajectory velocity determination is calculated. The graphical dependence of these errors on the measurement range is given.

On the basis of the investigation it has been concluded that the measurement errors of trajectory velocity depends on the choice of a reference quartz resonator (generator) for the synthesis of the carrier frequency and sampling frequency, the energy characteristics of the radar station, the observing angle which the trajectory velocity is measured at and method of information signal processing.

Thus, an additive mathematical model of the relative error of the trajectory velocity measurement has been developed and analyzed on the experimental data. The values of parameters and characteristics of the model were determined.

The results of the investigation demonstrated that the error associated with the probe signal wavelength instability is not predominant. The greatest contribution to the total error is made by the signal-to-noise ratio. If the range of the radar is small, place the device closer to the axis of the object trajectory to reduce the angle error.

Keywords — Doppler shift, radar station, trajectory velocity measurement, mathematical model, relative error.

REFERENCES

- Liventsev E.V., Pereverzev A.L., Primakov E.V., Ryzhkova D.V., Silantiev A.M. Accurate High-speed Frequency Meter for Doppler Initial Velocity Measurement // Problems of Perspective Micro- and Nanoelectronic Systems Development - 2018. Issue 2. P. 156-161. doi:10.31114/2078-7707-2018-2-156-161
- [2] Medeev D.A. Opredelenie doplerovskogo smeshcheniya malorazmernyh vysokoskorostnyh ob"ektov // Tezisy dokladov 28-oj Vserossijskoj mezhvuzovskoj nauchnotekhnicheskoj konferencii studentov i aspirantov «Mikroelektronika i informatika». Moskva, Zelenograd, Rossiya. 29-30 aprelya 2021 g. S. 132.
- [3] Stanciya ballisticheskaya «LUCH-83» // Tekhnicheskoe opisanie ASHV.1.400.003.TO. Nizhnij Tagil, Institut ispytaniya metallov, 1984. 110 s.
- [4] Patent № 2421752 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK G01S 13/58. Ustrojstvo dlya izmereniya traektornoj skorosti ob"ekta : № 2009136646/09 : zayavl. 06.10.2009 : opubl. 20.06.2011 / E. I. Makushev ; zayavitel' Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya Moskovskij gosudarstvennyj institut elektronnoj tekhniki (tekhnicheskij universitet) (MIET), Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennosťyu "Tekhnologiya".
- [5] Bakulev P.A. Radiolokacionnye sistemy: Uchebnik dlya vuzov. M.: Radiotekhnika, 2004, 320 s.
- [6] Homenko I.V. Kvarcevye rezonatory i generatory: ucheb. posobie / I. V. Homenko, A. V. Kosyh; Minobrnauki Rossii, OmGTU. Omsk : Izd-vo OmGTU, 2018. 160 s.
- [7] Sovremennaya radiolokaciya. Per. s angl. / Pod red. YU.B. Kobzareva. M.: Sov. radio, 1969. 704 s.
- [8] Solov'ev V.A., YAroshchuk S.S., Fedotov A.V., Konohov V.E. Sravnitel'nyj analiz lazernogo i radiolokacionnogo metodov izmereniya nachal'noj skorosti snaryada // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2019. № 9. S. 168-175.
- [9] Medeev D.A. Cifrovaya obrabotka informacionnogo signala s doplerovskoj RLS vo vremennoj oblasti // Trudy 24-j Mezhdunarodnoj konferencii «Cifrovaya obrabotka signalov i eyo primeneniya – DSPA-2022». Moskva, Rossiya. 30 marta-1 aprelya 2022 g. S. 183-187.