

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНОЙ СКОРОСТИ ДВИЖУЩИХСЯ НАЗЕМНЫХ ЦЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ТРЕХЧАСТОТНОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

Н. А. Сазонов, В. Н. Щербинин

*Тамбовское высшее военное авиационное инженерное училище радиозлектроники
(Военный институт)*

Представлена членом редколлегии профессором Ю.Л. Муромцевым

Ключевые слова и фразы: направление движения; полная скорость; радиальная скорость; радиолокатор с синтезированной апертурой; селекция движущихся целей; угол наблюдения; угол падения радиоволн.

Аннотация: Рассмотрен и исследован один из вариантов определения полной скорости и направления движения наземных целей с помощью трехчастотной радиолокационной станции с синтезированной апертурой антенны, установленной на летательном аппарате. Получены и проанализированы математические соотношения, позволяющие рассчитывать вектор полной скорости движения наземных целей и оценивать погрешность определения величины и направления этой скорости.

Практика показывает, что решение многих народнохозяйственных и военных задач, а также задач, решаемых Министерством по чрезвычайным ситуациям, зависит от наличия достоверной информации, которая может быть получена с помощью радиолокационных средств обзора земной поверхности, установленных на летательных аппаратах (ЛА). Среди этих средств важнейшее место занимают радиолокационные станции с синтезированной апертурой антенны (РСА) и цифровой обработкой сигналов [1 – 5]. Современные РСА позволяют получать радиолокационное изображение земной поверхности и расположенных на ней объектов (целей) с высоким разрешением по азимуту и дальности, которое близко по качеству к фотоснимкам, в любое время года и суток, независимо от уровня освещенности, метеорологических условий и на больших дальностях в реальном масштабе времени, а также осуществлять селекцию движущихся целей (СДЦ) на фоне отражений от земной поверхности и измерять их радиальные скорости [6 – 12].

Целью данной работы является получение и исследование алгоритмов определения полной скорости и направления движения наземной цели с помощью РСА, установленной на ЛА.

Сущность СДЦ в РСА, расположенной на ЛА, заключается в компенсации мощных отражений от земной поверхности (фона) и выделении сигнала только от движущихся целей (ДЦ) для их обнаружения и измерения радиальных скоростей и координат [6, 7]. Из всех РСА с СДЦ наибольшей точностью измерения радиальной скорости $V_{RЦ}$ наземной движущейся цели при больших значениях отношения фон-сигнал обладают трехчастотные РСА [8 – 10]. В таких РСА

$$V_{RЦ} = \frac{\lambda_3 (\varphi_{2-1} + \varphi_{3-2})}{4\pi (T_{зад, 2-1} + T_{зад, 3-2})}, \quad (1)$$

где $T_{\text{зад}, 2-1}$ и $T_{\text{зад}, 3-2}$ – время задержки синтезирования апертуры антенны во втором канале относительно первого и в третьем канале относительно второго; λ_3 – длина волны принимаемого сигнала в третьем канале обработки; φ_{2-1} и φ_{3-2} – фазовые сдвиги между сигналами от ДЦ, принятых по каналам 1,2 и 2,3, обусловленные $T_{\text{зад}, 2-1}$ и $T_{\text{зад}, 3-2}$ соответственно.

Время задержки начала синтезирования апертуры антенны в частотных каналах 2 и 3 относительно первого канала определяется после расчета интервалов синтезирования $T_{\text{ск}}$ для каждого канала по формулам [8, 9]:

$$T_{\text{зад}, 2-1} = (T_{\text{с}1} - T_{\text{с}2})/2, \quad T_{\text{зад}, 3-2} = (T_{\text{с}2} - T_{\text{с}3})/2,$$

где $T_{\text{ск}} = \lambda_k R_0 / (2\rho_\alpha V_T)$, $k = 1, 2, 3$; λ_k – длина волны сигнала в k -м канале; R_0 – текущее расстояние между фазовым центром антенны РСА и центром картографируемого участка на земной поверхности [3]; ρ_α – линейное разрешение РСА по азимуту; V_T – тангенциальная составляющая скорости ЛА по азимуту.

Покажем возможность определения полной скорости ДЦ при условии измерения их радиальных скоростей (1) с помощью РСА. Кроме того, поскольку дальность от ЛА до наземных целей, как правило, значительно больше высоты его полета, то задачу определения полной скорости и направления движения цели можно решать на плоскости.

На рис. 1 представлена геометрия задачи определения полной скорости и направления движения наземной цели на плоскости. На этом рисунке введены следующие обозначения: $V_{\text{ЛА}}$ – вектор скорости ЛА; $\theta_{\text{П}}$ – угол между направлением вектора полной скорости ДЦ $V_{\text{П}}$ и отрицательным направлением оси X , параллельной вектору $V_{\text{ЛА}}$, (определяет направление движения наземной цели); θ_1 и θ_2 – углы наблюдения ДЦ на земной поверхности; α_1 и α_2 – углы между направления-

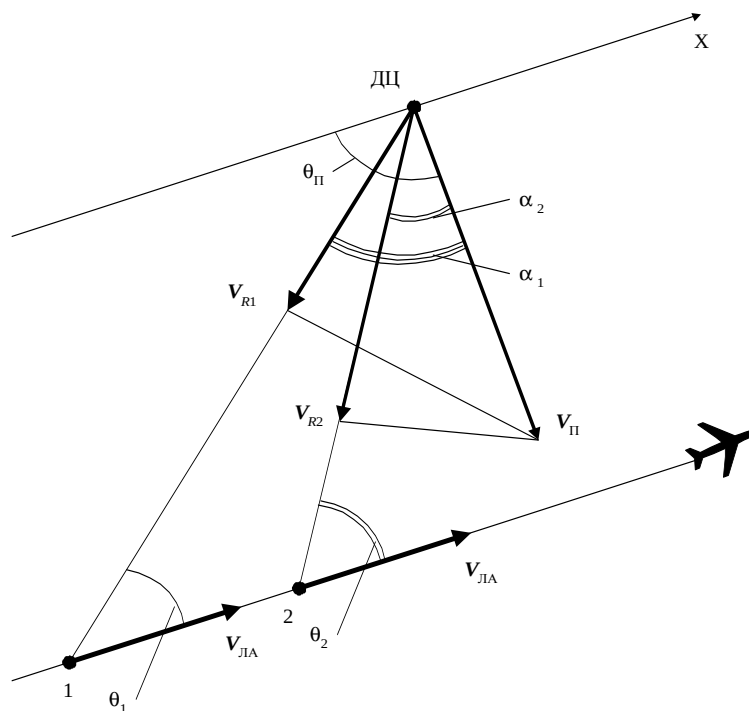


Рис. 1 Геометрия определения скорости наземной ДЦ на плоскости

ми векторов полной скорости и радиальных скоростей V_{R1} и V_{R2} в моменты времени 1 и 2, соответствующие центрам первого и второго интервалов синтеза антенны.

Из рис. 1 следует, что

$$\theta_{\Pi} = \theta_1 + \alpha_1 = \theta_2 + \alpha_2, \quad (2)$$

$$V_{R1} = V_{\Pi} \cos \alpha_1, \quad V_{R2} = V_{\Pi} \cos \alpha_2.$$

Следовательно,

$$\alpha_1 = \arccos \frac{V_{R1}}{V_{\Pi}}, \quad \alpha_2 = \arccos \frac{V_{R2}}{V_{\Pi}}. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим

$$\theta_{\Pi} = \theta_1 + \arccos \frac{V_{R1}}{V_{\Pi}} = \theta_2 + \arccos \frac{V_{R2}}{V_{\Pi}}. \quad (4)$$

Отсюда, используя известную математическую формулу

$$\arccos a \pm \arccos b = \arccos \left(ab \mp \sqrt{1-a^2} \sqrt{1-b^2} \right),$$

после несложных преобразований можно найти, что

$$V_{\Pi} = \frac{\sqrt{V_{R1}^2 + V_{R2}^2 - 2V_{R1}V_{R2} \cos(\theta_2 - \theta_1)}}{\sin(\theta_2 - \theta_1)}. \quad (5)$$

Углы θ_1 и θ_2 в (4) и (5) находятся в РСА по положению оси диаграммы направленности антенны и смещению ДЦ относительно своего истинного положения, которое обусловлено эффектом Доплера [6 – 8, 12].

Полученные соотношения (5) и (4) определяют величину и направление полной скорости движения наземной цели в случае значительного превышения дальности до ДЦ высоты полета ЛА.

При соизмеримых значениях дальности до ДЦ и высоты полета ЛА для определения полной скорости и направления движения наземной цели следует перейти от плоской модели к пространственной, которая изображена на рис. 2. Здесь: θ'_1, θ'_2 – углы между вектором скорости ЛА и направлением на ДЦ; V_{R1} и V_{R2} – проекции векторов V_{R1} и V_{R2} соответственно на линии визирования; γ_1, γ_2 – углы падения радиоволн при первом и втором измерениях. Из рис. 2 следует, что

$$\gamma_1 = \arcsin \frac{H_1}{R_1}, \quad \gamma_2 = \arcsin \frac{H_2}{R_2},$$

где H_1, H_2 – высоты полета ЛА в соответствующие моменты измерения; R_1 и R_2 – измеряемые РСА расстояния до ДЦ при различных углах наблюдения,

$$\theta_1 = \arccos(\cos \theta'_1 / \cos \gamma_1), \quad \theta_2 = \arccos(\cos \theta'_2 / \cos \gamma_2); \quad (6)$$

$$V_{R1} = V'_{R1} / \cos \gamma_1, \quad V_{R2} = V'_{R2} / \cos \gamma_2. \quad (7)$$

Подставив (7) в равенства (4) и (5), найдем

$$\theta_{\Pi} = \theta_1 + \arccos \frac{V'_{R1}}{V_{\Pi} \cos \gamma_1} \quad \text{или} \quad \theta_{\Pi} = \theta_2 + \arccos \frac{V'_{R2}}{V_{\Pi} \cos \gamma_2}, \quad (8)$$

$$V_{\Pi} = \frac{\sqrt{(V'_{R1} \cos \gamma_2)^2 + (V'_{R2} \cos \gamma_1)^2 - 2V'_{R1}V'_{R2} \cos \gamma_1 \cos \gamma_2 \cos(\theta_2 - \theta_1)}}{\cos \gamma_1 \cos \gamma_2 \sin(\theta_2 - \theta_1)}. \quad (9)$$

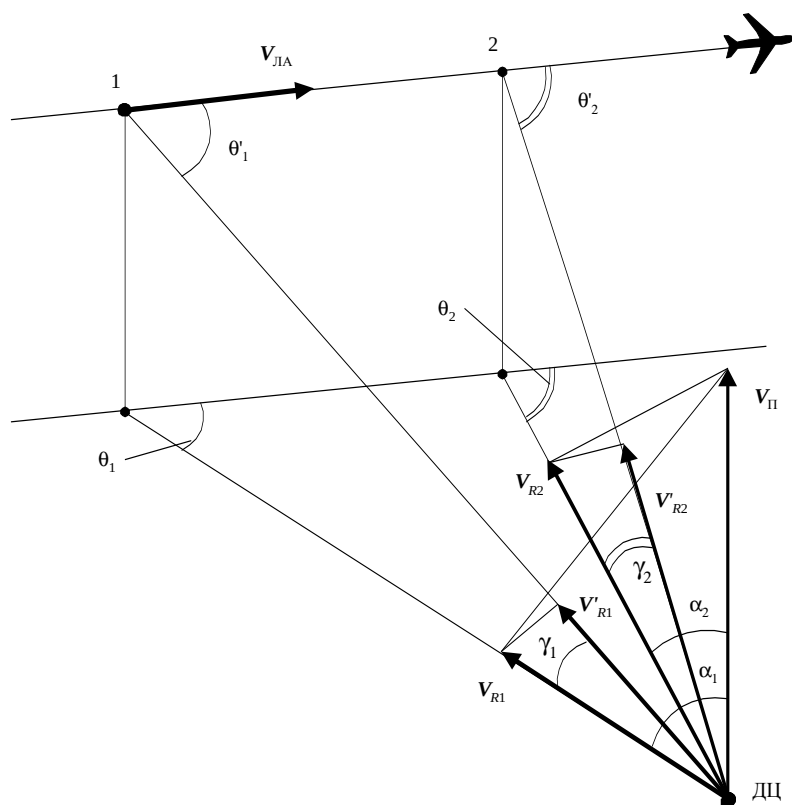


Рис. 2 Геометрия определения скорости ДЦ в пространстве

Равенства (8) и (9) с учетом (6) выражают алгоритм расчета направления движения наземной цели и скорости ее движения.

Исследования точности полученного алгоритма были проведены на ПЭВМ с помощью разработанной модели трехчастотной РСА. Результаты моделирования приведены на рис. 3 – 5. Рис. 3 показывает зависимость средней квадратической ошибки (СКО) $\sigma_{\theta_{П}}$ определения направления движения наземной цели от отношения фон-сигнал. На этом рисунке кривая 1 получена, когда $V_{П} = 1$ м/с, $\theta_1 = 80^\circ$, $\theta_2 = 85^\circ$, $\theta_{П} = 85^\circ$; кривая 2 – при $V_{П} = 1$ м/с, $\theta_1 = 80^\circ$, $\theta_2 = 85^\circ$, $\theta_{П} = 0^\circ$; кривая 3 – при $V_{П} = 1$ м/с, $\theta_1 = 80^\circ$, $\theta_2 = 80,5^\circ$, $\theta_{П} = 85^\circ$; кривая 4 – при $V_{П} = 3$ м/с, $\theta_1 = 80^\circ$, $\theta_2 = 85^\circ$, $\theta_{П} = 85^\circ$.

Из рис. 3 следует, что точность определения направления движения наземной цели изменяется незначительно до отношения фон-сигнал 10^3 , а затем начинает довольно быстро ухудшаться, причем ухудшение возрастает с увеличением скорости движения цели, уменьшением разности углов наблюдения и при направлении ее движения, близком к перпендикуляру относительно оси диаграммы направленности антенны РСА.

Рис. 4 и 5 отображают зависимость СКО определения величины полной скорости $\sigma_{V_{П}}$ от отношения фон-сигнал. На рис. 4 кривая 1 получена при условии, что скорость цели $V_{П} = 1$ м/с, а направление ее движения $\theta_{П} = 85^\circ$; кривая 2 – при $V_{П} = 3$ м/с и $\theta_{П} = 85^\circ$; кривая 3 – при $V_{П} = 1$ м/с и $\theta_{П} = 0^\circ$. Все три зависимости получены при углах наблюдения $\theta_1 = 80^\circ$ и $\theta_2 = 85^\circ$. Из анализа графиков следует, что точность измерения полной скорости наземной ДЦ ухудшается при увеличении

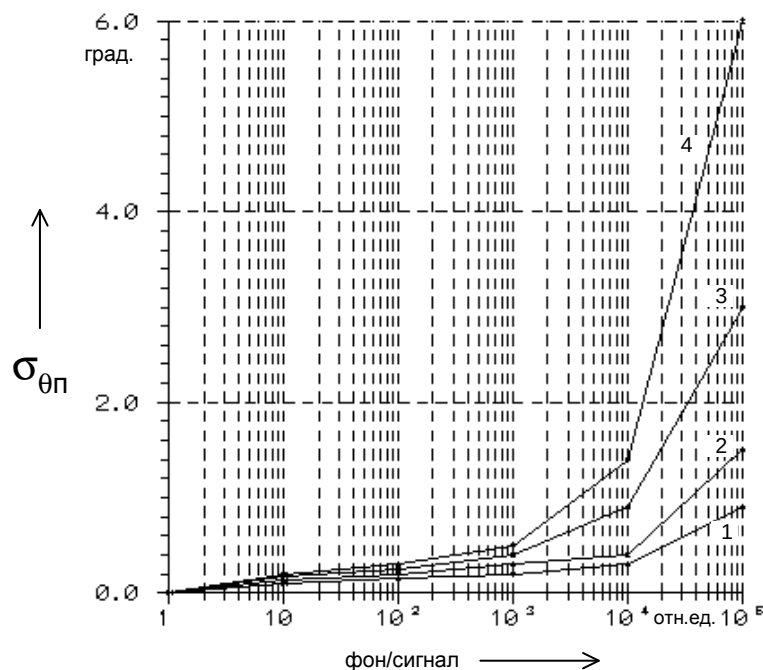


Рис. 3 Зависимость СКО определения направления движения цели от отношения фон-сигнал

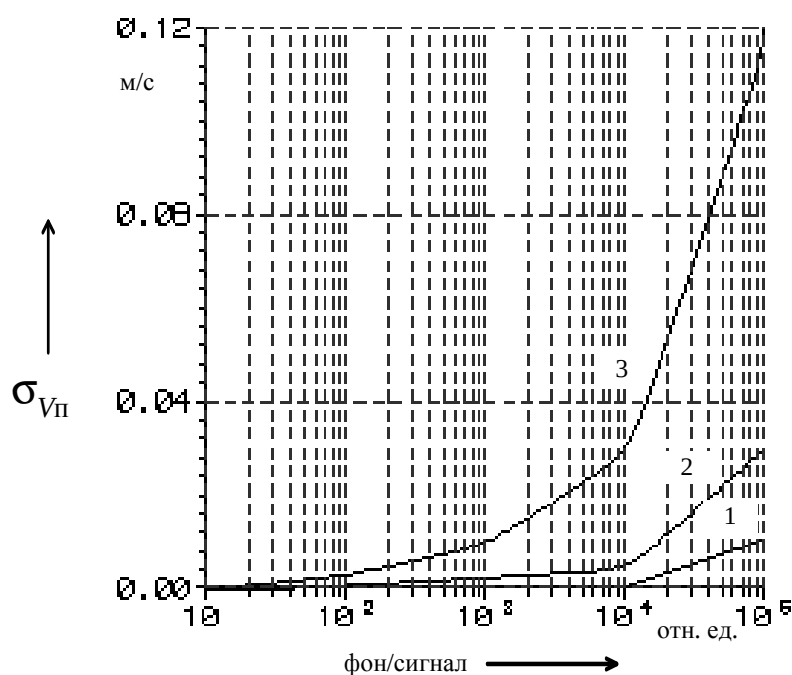


Рис. 4 Зависимость СКО определения скорости ДЦ от отношения фон-сигнал

отношения фон-сигнал, а также при движении цели в направлении, отличающемся от направления на РСА. Погрешность измерения полной скорости максимальна при движении цели вдоль перпендикуляра к оси диаграммы направленности ан-

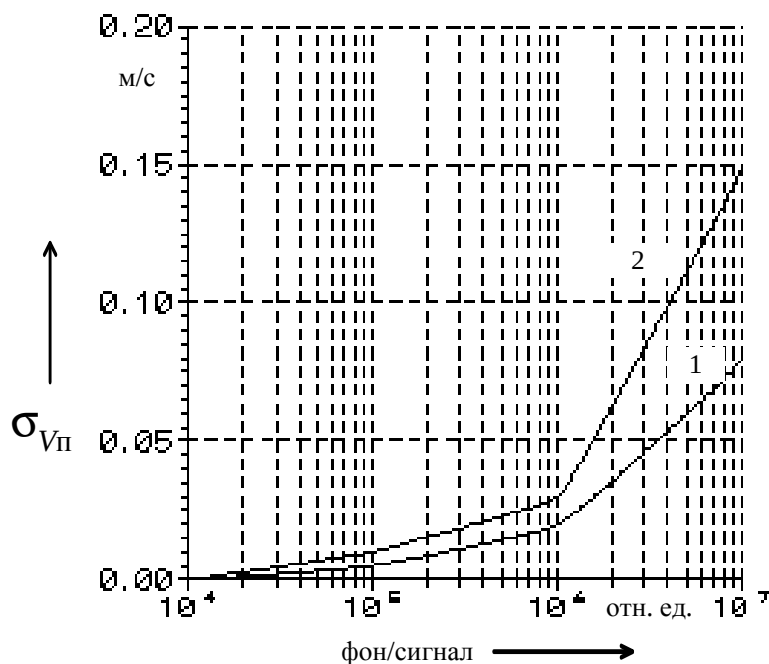


Рис. 5 Зависимость СКО определения скорости ДЦ от отношения фон-сигнал при $V_{\Pi} = \text{const}$ и $\theta_{\Pi} = \text{const}$

тенны РСА. Ухудшение точности измерения с увеличением скорости цели (кривая 2 на рис. 4) вызвано тем, что за время задержки между интервалами синтеза антенны цель успевает сместиться на большее расстояние. Эта зависимость очень слабая и начинает проявляться только при больших отношениях фон-сигнал ($> 10^2$).

На рис. 5 кривая 1 получена при углах наблюдения $\theta_1 = 80^\circ$ и $\theta_2 = 85^\circ$, а кривая 2 – при $\theta_1 = 80^\circ$ и $\theta_2 = 80,5^\circ$. Значения полной скорости и ее направление брались одинаковыми для обеих кривых. Из графиков следует, что с уменьшением разности углов наблюдения погрешность измерения скорости ДЦ увеличивается. Кривая 2 соответствует случаю, когда интервалы синтеза при углах наблюдения θ_1 и θ_2 соприкасаются (следуют сразу друг за другом). Точность измерения в этом случае ухудшается, однако позволяет достаточно точно измерять скорость наземной цели, что немаловажно для оперативного получения информации о цели.

Для исследуемого алгоритма было получено аналитическое выражение для СКО расчета полной скорости наземной ДЦ:

$$\sigma_{V_{\Pi}} = \left\{ \sigma_{V_{R1}}^2 \left[\cos(\theta_{\Pi} - \theta_1) - \cos(\theta_{\Pi} - \theta_2) \cos(\theta_2 - \theta_1) \right]^2 + 2\sigma_{V_{R1}}\sigma_{V_{R2}}\rho_{V_{R1}, V_{R2}} \times \right. \\ \left. \times \left[\cos(\theta_{\Pi} - \theta_1) - \cos(\theta_{\Pi} - \theta_2) \cos(\theta_2 - \theta_1) \right] \left[\cos(\theta_{\Pi} - \theta_2) - \cos(\theta_{\Pi} - \theta_1) \cos(\theta_2 - \theta_1) \right] + \right. \\ \left. + \sigma_{V_{R2}}^2 \left[\cos(\theta_{\Pi} - \theta_2) - \cos(\theta_{\Pi} - \theta_1) \cos(\theta_2 - \theta_1) \right]^2 \right\}^{1/2} / \sin^2(\theta_2 - \theta_1), \quad (10)$$

где $\rho_{V_{R1}, V_{R2}}$ – нормированная взаимная корреляционная функция погрешностей измерения радиальных скоростей ДЦ; $\sigma_{V_{R1}}, \sigma_{V_{R2}}$ – СКО измерения радиальных скоростей V_{R1} и V_{R2} при углах наблюдения θ_1 и θ_2 соответственно. Формула (10)

выражает зависимость погрешности определения полной скорости ДЦ от погрешностей измерения радиальных скоростей в РСА, направления движения цели и разности углов ее наблюдения. Если интервалы синтезирования, при которых осуществляется измерение радиальных скоростей, не перекрываются, то погрешности измерения радиальных скоростей можно считать статистически независимыми величинами. В этом случае $\rho_{VR1, VR2} \approx 0$, и соотношение (10) существенно упрощается:

$$\sigma_{V_{\Pi}} = \left\{ \sigma_{VR1}^2 [\cos(\theta_{\Pi} - \theta_1) - \cos(\theta_{\Pi} - \theta_2) \cos(\theta_2 - \theta_1)]^2 + \right. \\ \left. + \sigma_{VR2}^2 [\cos(\theta_{\Pi} - \theta_2) - \cos(\theta_{\Pi} - \theta_1) \cos(\theta_2 - \theta_1)]^2 \right\}^{1/2} / \sin^2(\theta_2 - \theta_1). \quad (11)$$

Среднюю квадратическую погрешность $\sigma_{\theta_{\Pi}}$ определения направления движения наземной цели можно найти с использованием формул (2) – (4):

$$\sigma_{\theta_{\Pi}} = \sqrt{\sigma_{\theta}^2 + \sigma_{\alpha}^2 + 2\sigma_{\theta}\sigma_{\alpha}\rho_{\theta, \alpha}}, \quad (12)$$

где σ_{θ} и σ_{α} – СКО расчета углов θ_1, α_1 (или θ_2, α_2); $\rho_{\theta, \alpha}$ – нормированная взаимная корреляционная функция погрешностей расчета углов θ_1, α_1 (или θ_2, α_2). В соотношении (12) СКО σ_{α} определяется следующим выражением

$$\sigma_{\alpha} = \frac{1}{V_{\Pi} \sin \alpha} \sqrt{\sigma_{VR}^2 + \sigma_{V_{\Pi}}^2 \cos^2 \alpha - 2\sigma_{VR}\sigma_{V_{\Pi}}\rho_{VR, V_{\Pi}} \cos \alpha},$$

где σ_{VR} – СКО измерения радиальной скорости V_{R1} (или V_{R2}) при значении угла α равном α_1 (или α_2); $\rho_{VR, V_{\Pi}}$ – взаимная корреляционная функция погрешностей определения скоростей V_{R1} и V_{Π} (или V_{R2} и V_{Π}).

Достоверность полученных выражений была проверена с помощью модели трехчастотной РСА на ПЭВМ. Было установлено, что оценка погрешности определения полной скорости и направления движения наземной цели с использованием формул (11) и (12) справедлива для РСА, в которых погрешности измерения радиальных скоростей не превышают 10^{-2} м/с.

Выводы

1 Полученные математические соотношения позволяют достаточно точно определять полную скорость и направление движения наземных целей с помощью трехчастотной РСА до отношения фон-сигнал 10^2 .

2 Результаты численных исследований показали, что точность определения полной скорости и направления движения целей зависят не только от отношения фон-сигнал на входе РСА, но и от направления движения цели относительно оси диаграммы направленности антенны, а также от разности углов наблюдения и величины скорости ДЦ. Однако эти зависимости начинают проявляться только при очень больших отношениях фон-сигнал ($>10^2$).

Список литературы

1 Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др.; Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.

- 2 Богачев, А.С. Применение радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенны. Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника / А.С. Богачев, Е.Ф. Толстов / Под ред. Р.Г. Мириманова. – М.: ВИНТИ, 1986. – 143 с.
- 3 Сазонов, Н.А. Особенности синтеза апертуры антенны при произвольной траектории летательного аппарата / Н.А. Сазонов // Радиотехника. – 1986. – № 8. – С. 89.
- 4 Ицхоки, Я.С. Основные характеристики РСА при произвольном движении летательного аппарата / Я.С. Ицхоки, Н.А. Сазонов, Е.Ф. Толстов // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. XXIX, № 11. – С. 2164.
- 5 Сазонов, Н.А. Алгоритм формирования радиолокационного изображения в авиационно-космической двухпозиционной РСА / Н.А. Сазонов, В.Н. Щербинин, М.М. Ярушкин // Радиотехника. – 2000. – № 4. – С. 71.
- 6 Сазонов, Н.А. Особенности селекции и восстановления «истинного» положения движущихся целей в РСА при произвольном полете носителя / Н.А. Сазонов // Радиотехника. – 1990. – № 8. – С. 3.
- 7 Сазонов, Н.А. Селекция и определение азимута движущихся наземных целей / Н.А. Сазонов, В.Н. Щербинин, М.М. Ярушкин // Радиотехника. – 2000. – № 6. – С. 30.
- 8 Сазонов, Н.А. Многочастотный способ селекции движущихся целей в РСА / Н.А. Сазонов, В.Н. Щербинин // Радиотехника. – 1995. – № 11. – С. 6.
- 9 Патент РФ № 2084920 МКИ 5 G 01 S 13/52. Способ селекции движущихся наземных целей / Сазонов Н.А., Щербинин В.Н. – Заявл. 26.01.94; Опубл. 20.07.97; Бюл. № 20.
- 10 Сазонов, Н.А. Влияние случайных факторов на точность измерения радиальной скорости в многочастотной РСА / Н.А. Сазонов, В.Н. Щербинин, М.М. Ярушкин // Радиотехника. – 1998. – № 3. – С. 91.
- 11 Патент РФ № 2205423 МКИ 7 G 01 S 13/52. Способ и устройство селекции движущихся целей в трехканальной цифровой РСА / Сазонов Н.А., Щербинин В.Н., Ярушкин М.М., Богословский Е.А. – Заявл. 07.07.98; Опубл. 27.05.2003; Бюл. № 15.
- 12 Медведев, Р.В. Синтез алгоритма селекции и измерения скорости движущихся наземных целей / Р.В. Медведев, Н.А. Сазонов, В.Н. Щербинин // Радиотехника. – 2003. – № 5. – С.45.

Identification of Total Velocity of Moving Ground-Based Targets by Means of Three-Frequency Radiolocation Station

N.A. Sazonov, V.N. Shcherbinin

Tambov Military Aviation Engineering College of Radioelectronics (Military Institute)

Key words and phrases: total velocity; angle of incidence of radio waves; movement direction; observation angle; radial velocity; selection of moving targets; synthetic aperture radar.

Abstract: One of the ways of determining the absolute velocity and movement direction of moving ground-based targets by means of three-frequency radiolocation station with synthetic aperture aerial installed on the aircraft is studied. Mathematical relations allowing for calculation of the vector of total speed of moving ground-based targets as well as estimation of errors are obtained and analyzed.

Bestimmung der vollen Geschwindigkeit der bewegenden Landziele mit Hilfe der Dreihäufigkeitsradarstation

Zusammenfassung: Es ist eine der Varianten der Bestimmung der vollen Geschwindigkeit und der Richtungen der Bewegung der Landziele mit Hilfe der Dreihäufigkeitsradarstation mit der synthetisierten Aperturantenne, die auf dem Flugapparat eingerichtet ist, untersucht und betrachtet. Es sind die mathematischen Verhältnisse, die den Vektor der vollen Geschwindigkeit die Bewegungen der Landziele und den Fehler die Bestimmungen die Größen und die Richtungen dieser Geschwindigkeit zu berechnen und zu bewerten zulassen, analysiert.

Définition de la vitesse complète des buts bougeants terrestres à l'aide de la station de radar à trois fréquences

Résumé: Est examinée et étudiée une des variantes de la définition de la vitesse complète et de la direction du mouvement des buts terrestres à l'aide de la station de radar à trois fréquences avec l'aperture synthétisée de l'antenne établie sur un appareil volant. Sont reçus et analysés les rapports mathématiques permettant de calculer le vecteur de la vitesse complète des buts terrestres et d'estimer l'erreur de la définition de la grandeur et de la direction de cette vitesse.
