



МЕТОД ОДНОВРЕМЕННЫХ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МИКРОНАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО МЕШАЮЩИМ ОТРАЖЕНИЯМ В ГЛАВНОМ ЛУЧЕ РАДАРА С КВАЗИНЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Предложен метод измерения/оценивания параметров траектории движения фазового центра антенны авиационного радара относительно земли по «мешающим» отражениям от поверхности, облучаемой главным лучом РЛС при квазинепрерывном излучении. Метод характеризуется повышенной точностью определения радиальной скорости при типичных инструментальных погрешностях частотных и временных измерений, ограничивающих их потенциальную точность, а также расширением информативности принимаемого сигнала.

Ключевые слова: авиационная РЛС с квазинепрерывным излучением; измерение радиальной скорости РЛС и дальности до земли; мешающие отражения по главному лучу.

Для цитирования:

Коврегин, В. Н. Метод одновременных частотно-временных измерений микронавигационных параметров по мешающим отражениям в главном луче радара с квазинепрерывным излучением / В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина // Системный анализ и логистика. – 2024. – № 1(39). – с. 43 – 52. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-1-43-52.

METHOD OF SIMULTANEOUS TIME-FREQUENCY MEASUREMENTS OF MICRONAVIGATION PARAMETERS BY INTERFERING REFLECTIONS IN THE MAIN BEAM OF A QUASI-CONTINUOUS RADIATION RADAR

V. N. Kovregin, G. M. Kovregina

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

A method is proposed for measuring/estimating the parameters of the trajectory of the phase center of an aviation radar antenna relative to the ground using “interfering” reflections from the surface irradiated by the main radar beam with quasi-continuous radiation. The method is characterized by increased accuracy in determining radial velocity under conditions of typical instrumental errors in frequency and time measurements, which limit their potential accuracy.

Keywords: aviation radar with quasi-continuous radiation; measurement of radar radial speed and range to the ground; interfering reflections in the direction of the main beam.

For citation:

Kovregin, V. N. Method of simultaneous time-frequency measurements of micronavigation parameters by interfering reflections in the main beam of a quasi-continuous radiation radar / V. N. Kovregin, G. M. Kovregina // System analysis and logistics. – 2024. – № 1(39). – p. 43 – 52. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-1-43-52.

Введение

При микронавигационном (МН) обеспечении эффективности функционирования РЛС авиационных базирования в настоящее время *актуальной проблемой* является повышение помехоустойчивости и точности современных специализированных МН систем в структуре РЛС [1, 2, 3] в сложной сигнально-шумовой/помеховой обстановке и, прежде всего, в условиях радиопомех спутниковым навигационным системам. Одно из направлений решения этой проблемы связано с расширением функциональных возможностей РЛС - в аспекте МН информативности РЛС и возможностей её использования в качестве дополнительного измерительно-вычислительного канала для коррекции МН системы (МНС) радара. Ранее, в работе [3], предложен метод измерения МН параметров фазового центра антенны радара (ФЦА) – радиальной скорости и дальности до земли по направлению главного луча (ГЛ) РЛС – на основе частотно-временных измерений сигналов «мешающих» отражений от земли по ГЛ при квазинепрерывном излучении (КНИ). Суть метода [3] заключается в том, что на основе адаптивно-робастного управления направлением ГЛ и/или параметрами КНИ гарантированно обеспечивается нахождение неоднозначной задержки сигнала (НЗС)/дальности от участка



земли (от полосы дальностей в «следе» ГЛ на поверхности), формирующего наиболее интенсивный эхосигнал, априори предполагаемый по направлению оси ГЛ. Кроме того, в рамках дискрета НЗС/дискрета неоднозначной дальности, наблюдаемого в «рабочей» зоне периода повторения импульсов (ППИ) исключается или существенно снижается влияния эффекта суперпозиции спектров эхосигналов от разных полосок дальности в границах следа ГЛ, расположенных на дальностях, кратных ППИ. Аналитическое исследование, модельные и натурные эксперименты показывают, что при обеспечении указанных выше условий – «наблюдаемости» в ППИ и «устойчивости» положения глобального максимума амплитуды сигнала (ГМА) в ППИ к негативным эффектам «наложения» сигналов – точность измерения скорости ФЦА и его наклонной дальности в направлении ГЛ, в основном, ограничена ошибками дискретизации частотно-временных измерений: шириной частотного фильтра; длительностью дискрета НЗС в рабочей зоне ППИ. Например, при типовых параметрах КНИ для РЛС X-диапазона длин волн λ значения среднеквадратического отклонения (СКО): для ошибок по дальности будут в диапазоне 10...50 м; для ошибок радиальной скорости при $\lambda=3$ см – в диапазоне 0,1...0,15 м/с. Использование таких радиолокационных измерений для коррекции МНС радара обеспечивает ее устойчивую работоспособность при помехах спутниковым навигационным системам, но в ряде задач РЛС не обеспечивает в полной мере требуемой точности микронавигации ФЦА. Как следствие, задача повышения точности МН измерений в РЛС в настоящее время является актуальной и практически значимой. *Цель данной работы* – представление метода МН измерений по «мешающим» отражениям от земли в направлении ГЛ при типовом КНИ, позволяющего в сравнении с вышеуказанным способом таких измерений существенно повысить точность определения радиальной скорости.

Основная часть

Известный метод измерения скорости ФЦА и дальности до земли [3] в результате адаптивно-робастного управления направлением ГЛ/параметрами КНИ на основе текущей МН информации обеспечивает такую ситуацию, когда:

- фрагмент поверхности, облучаемый ГЛ («след» ГЛ) является ограниченным;
- предполагаемый по направлению оси ГЛ глобальный максимум амплитуды сигнала будет гарантированно соответствовать дискрету НЗС в пределах рабочей зоны ППИ;
- суперпозиция спектров, формируемых по сигналам от нескольких дистанцированных кратно ППИ полосок дальности в следе ГЛ отсутствует или не оказывает влияния на положение ГМА в ППИ.

На рис.1 показан характерный для такой ситуации результат обработки реального сигнала (при высоте ФЦА $H \approx 270$ м, скорости $V \approx 60$ м/с и угле наклона оси ГЛ $\beta \approx 8,5^\circ$) в виде превысивших заданный «порог» значений амплитуд сигнала после быстрого преобразования Фурье (БПФ) – в зависимости от номеров дискретов НЗС в рабочей зоне ППИ и номеров доплеровских фильтров. Видно, что все НЗС от следа ГЛ находятся в пределах рабочей зоны ППИ, занимают только ее часть. Информативными измерениями считаются [4] только связанные с ГМА номер дискрета НЗС и номер фильтра, по которым далее получают оценки доплеровской частоты (ДЧ) F_D /скорости V_R и НЗС τ /дальности R от ФЦА до земли – по направлению именно к той полоске дальностей в следе ГЛ, сигналы от которой дали ГМА.

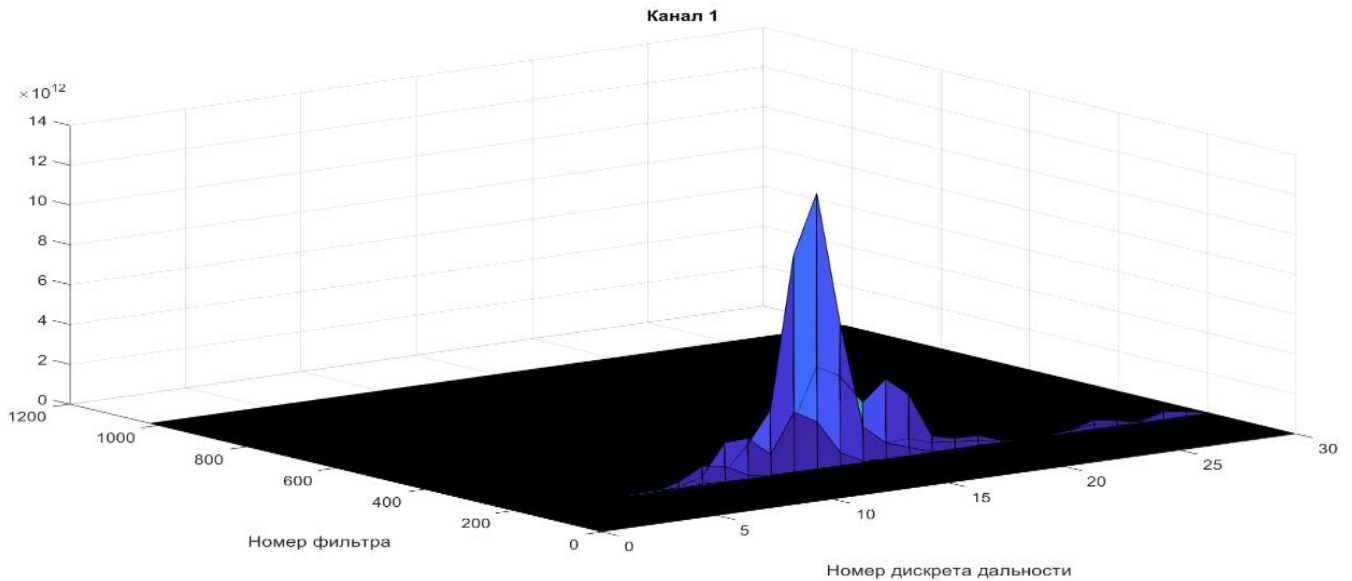


Рис. 1. Амплитуды эхосигналов от следа ГЛ в зависимости от номера дискрета НЗС/дальности в рабочей зоне ППИ и от номера доплеровского фильтра (угол наклона оси ГЛ $\approx 8,5^0$)

В таком случае потенциальная точность по скорости и дальности ограничена шириной фильтра Δf_D и дискрета НЗС $d\tau$, т. е. инструментальными погрешностями частотно-временных измерений. В то же время ДЧ, определяемая по максимуму амплитуды сигнала в любом другом наблюдаемом дискрете НЗС – локальному максимуму амплитуды (ЛМА) в ППИ – также содержит информацию о скорости/дальности, но уже по другому направлению (углу наклона) в рамках угловой ширины ГЛ.

В общем случае, для любого дискрета НЗС с выявленным ГМА или ЛМА, дающего оценку НЗС τ_i в ППИ T_r с индексом r_j , соответствующий угол наклона $\beta_{(j,i)}$ определяется как

$$\beta_{(j,i)} = \arcsin \frac{2H}{c(r_j T_r + \tau_i)}, \quad (1)$$

где H – высота ФЦА над земной поверхностью, предполагаемой как горизонтальная и плоская; c – скорость радиоволны. Типичный вид зависимости угла наклона от дальности (в виде однозначной задержки сигнала) при заданной высоте показан на рис.2, где «красные точки» на кривой соответствуют углам/однозначным задержкам сигнала, при которых проявляется ГМА в одном определенном дискрете НЗС с оценкой НЗС τ . По оси однозначной задержки сигнала интервал между этими точками постоянный и равен ППИ. Для случая, показанного на рис.1, индекс ППИ $r_j = 0$ и рассматривается только начальный нелинейный участок кривой слева – до второй «красной точки».

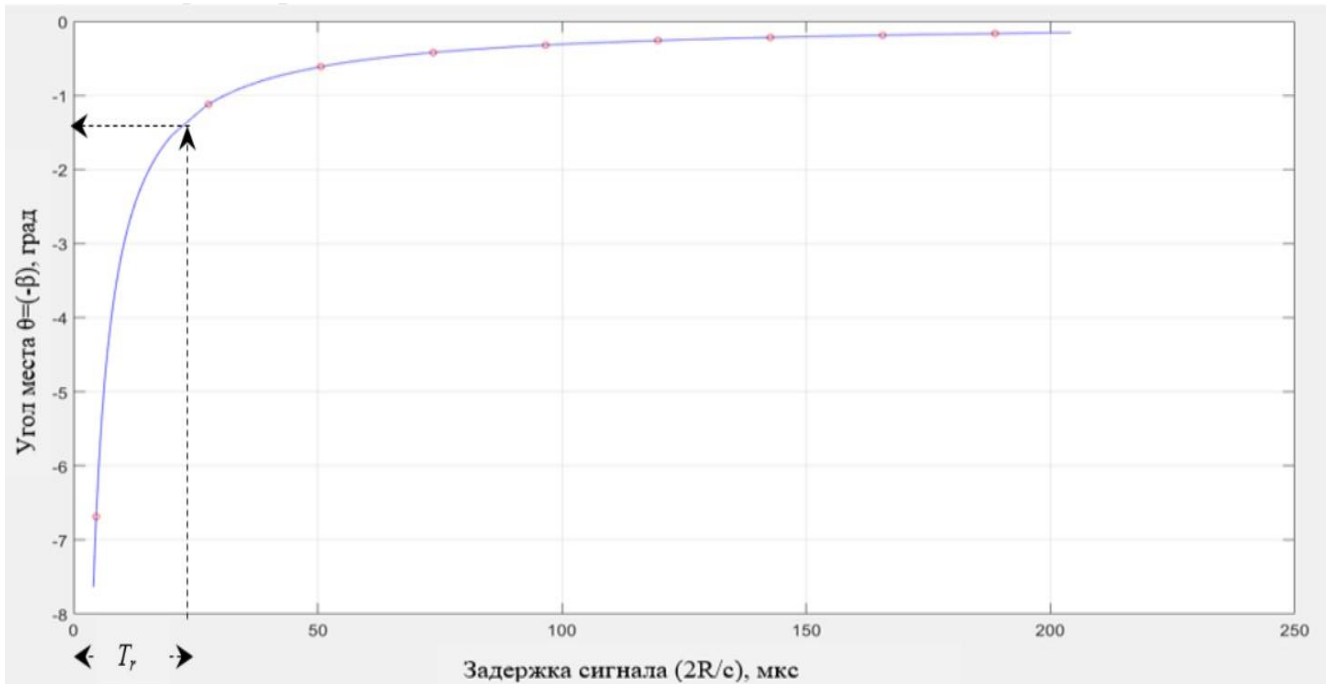


Рис. 2. Угол места (наклона) по направлению к полосе дальности на следе ГЛ в зависимости от однозначной задержки сигнала от этой полосы

Анализ выражения (1) и кривой на рис.2 позволяет сделать следующий вывод.

Если в следе ГЛ нет полос дальности, дистанцированных на кратные ППИ расстояния, то в спектре сигнала в каждом наблюдаем дискрете НЗС присутствует один явно выраженный амплитудный максимум (ГМА или ЛМА), поскольку нет суперпозиции спектров сигналов от разных полос. Однако «центральная» ДЧ, соответствующая ГМА или ЛМА по дискрету НЗС, нелинейно изменяется – в зависимости от положения дискрета НЗС в ППИ, возрастая при увеличении номера дискрета/оценки НЗС. Такая девиация ДЧ в пределах рассматриваемой рабочей зоны одного ППИ в любом случае присутствует, причем:

- при больших дальностях/малых углах наклона, малых скоростях она может считаться незначительной, если укладывается в ширину доплеровского фильтра, т. е. она фактически не проявляется и не может существенно повлиять на результат измерения/оценки ДЧ (например, правая часть кривой на рис. 2 при однозначной задержке более 100 мкс, близкая к линейной аппроксимации);
- при малых дальностях/относительно больших углах наклона, больших скоростях эта девиация может быть уже существенной даже для дискретов НЗС в пределах одного ППИ, может составлять диапазон в несколько номеров фильтров, т. к. диапазон углов наклона при этом составляет уже единицы градусов (см. «ярко выраженную» нелинейность в правой части кривой на рис. 2).

Как пример, на рис. 3 показаны амплитуды реального сигнала в пределах ГЛ, которые в отличие от сигнала, показанного на рис.1, получены при большем угле наклона оси ГЛ ($\approx 11^\circ$).

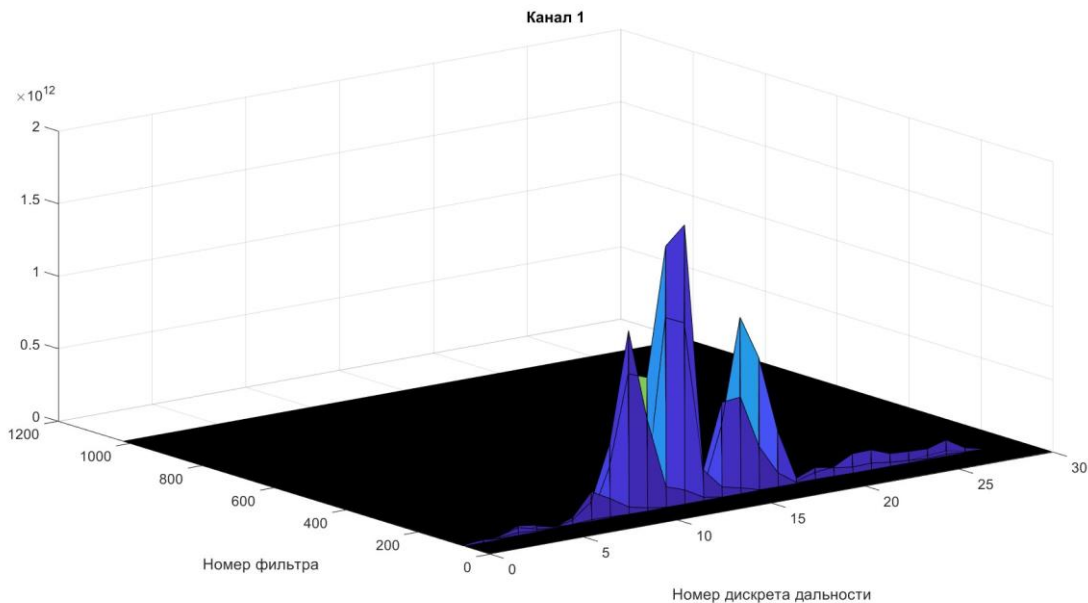


Рис. 3. Амплитуды сигналов от следа ГЛ в зависимости от номера дискрета НЗС/дальности в рабочей зоне ППИ и от номера доплеровского фильтра (угол наклона оси ГЛ $\approx 11^\circ$)

При установленном пороге максимумы амплитуд выявлены в дискретах НЗС с номерами 9 (ЛМА), 12 (ГМА), 15 (ЛМА) с шириной дискрета $\approx 0,5$ мкс (≈ 75 м) при номерах фильтров 85, 86, 88 с шириной фильтра ≈ 20 Гц, соответственно, т. е. в данном случае девиация («дрейф» ДЧ по дискретам НЗС уже существенна, измеряется даже при относительно широких доплеровских фильтрах и, тем более, при «тонком» спектральном анализе. Эти экспериментальные данные подтверждают присутствие «дрейфа» ДЧ в рамках ППИ, причем подчиняющегося нелинейному закону. В такой ситуации оценка ДЧ/скорости, полученная, например, на основе усреднения значений доплеровских частот, полученных в разных дискретах НЗС, может быть некорректной (смещенной).

Принимая как базовый дискрет НЗС с ГМА, угол наклона β_0 до соответствующей ему полосы дальности в следе ГЛ определяется соотношением вида (1) с точностью, которая в виде абсолютной ошибки $\delta\beta_0$ выражается через абсолютные ошибки измерения дальности δR и определения высоты над этой полосой δH следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta\beta_0 &= \left[\sqrt{1 - \left[\frac{H}{R_0} \right]^2} \right]^{-1} \left[\frac{H\delta R_0 + R_0\delta H}{R_0^2} \right] = \frac{1}{\cos \beta_0} \left[\frac{\delta R \sin \beta_0 + \delta H}{R_0} \right] = \frac{\delta R \operatorname{tg} \beta_0}{R_0} + \frac{\delta H}{R_0 \cos \beta_0} = \\ &= \left[\sqrt{1 - [\sin \beta_0]^2} \right]^{-1} \left[\frac{\delta R \sin \beta_0}{R_0} + \frac{\delta H}{R_0} \right] = \frac{\delta R}{R_0} \operatorname{tg} \beta_0 + \frac{\delta H}{R_0} \sec \beta_0 = \frac{1}{R_0} [\delta R \operatorname{tg} \beta_0 + \delta H \sec \beta_0]. \quad (2) \end{aligned}$$

Примечание:

В соотношении (2) и далее абсолютная ошибка δX случайной величины X понимается как половина интервала $X^* \pm \delta X$, в котором находится истинное значение этой величины, где X^* - измерение/оценка величины X . Полагается, что $\delta X \approx 3\sigma_x$, где σ_x – среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибок измерения. При задании точности определения дальности R_0 и высоты H в виде СКО σ_{R_0} , и σ_H для расчета дисперсии $D_{\beta_0} = (\sigma_{\beta_0})^2$ и СКО σ_{β_0} ошибок определения угла места β_0 используются соотношения:



$$(\sigma_{\beta_0})^2 = \left(\frac{1}{R_0} \operatorname{tg} \beta_0 \right)^2 (\sigma_{R_0})^2 + \left(\frac{1}{R_0} \operatorname{sec} \beta_0 \right)^2 (\sigma_H)^2;$$

$$\sigma_{\beta_0} = \sqrt{\left(\frac{1}{R_0} \operatorname{tg} \beta_0 \right)^2 (\sigma_{R_0})^2 + \left(\frac{1}{R_0} \operatorname{sec} \beta_0 \right)^2 (\sigma_H)^2} = \frac{1}{R_0} \sqrt{(\operatorname{tg} \beta_0)^2 (\sigma_{R_0})^2 + (\operatorname{sec} \beta_0)^2 (\sigma_H)^2}.$$

Для любого другого дискрета НЗС в ППИ с выявленным максимумом амплитуды по аналогии с выражением (1) определяется угол наклона β_n , абсолютная ошибка которого также может быть определена по соотношению вида (2). Этот угол также выражается и через β_0 :

$$\beta_n = \arcsin \left[\frac{1}{\sin \beta_0} - \frac{c \Delta \tau_{0/n}}{2 H} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где $\Delta \tau_{0/n} = \tau_0 - \tau_n$ - разность оценок НЗС для базового и рассматриваемого дискрета НЗС. Для рекуррентного расчета углов наклона для всех дискретов НЗС в ППИ из (3) следует

$$\beta_k = \arcsin \left[\frac{1}{\sin \beta_{k-1}} - \frac{c d\tau}{2 H} \right],$$

где $k=1, 2, \dots, K_n$, причем нулевое значение ($k-1$) для соответствует дискрету НЗС с наибольшей задержкой/дальностью в пределах ППИ; $d\tau = \tau_{pulse}/k = \text{const}$ - заданная ширина дискрета НЗС при обработке сигнала; k - целочисленный коэффициент для внутрипериодного «скользящего» суммирования, как правило, 1...4).

Доплеровские частоты F_D , соответствующие амплитудным максимумам, наблюдаемым в разных дискретах НЗС и, следовательно, при разных направлениях, в общем случае, вызваны одной и той же скоростью ФЦА V , но в виде проекций на разные направления. Например, для двух направлений с углами φ_0 и φ_k относительно вектора траекторной скорости V :

$$\frac{F_{D0}}{\cos \varphi_0} = \frac{F_{Dk}}{\cos \varphi_k}; \quad F_{D0} = F_{Dk} \left(\frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi_k} \right).$$

Если на момент начала излучения пачки импульсов фиксируется горизонтированная «правая» прямоугольная система координат $OXYZ$ с началом в ФЦА на геометрической высоте H , осью OX , совпадающей с направлением горизонтальной проекции траекторной скорости V (направлением путевой скорости W) и осью OY , направленной вверх по вертикали, то при угле α между горизонтальной проекцией оси ГЛ и вектором скорости W направляющие косинусы в $OXYZ$ для направления с углом наклона β_0 в рамках ширины ГЛ:

$$\cos \varphi_{0GL-X} = \cos \alpha \cos \beta_0; \quad \cos \varphi_{0GL-Y} = \cos \left(\frac{\pi}{2} + \beta_0 \right) = -\sin \beta_0; \quad \cos \varphi_{0GL-Z} = \sin \alpha \cos \beta_0.$$

Направляющие косинусы для вектора скорости V в $OXYZ$:

$$\cos \varphi_{V-X} = \frac{W}{V}; \quad \cos \varphi_{V-Y} = \frac{V_Y}{V}; \quad \cos \varphi_{V-Z} = 0, \quad \text{где } V_Y = V_H - \text{вертикальная проекция скорости } V.$$

$$\text{Тогда: } \cos \varphi_0 = \frac{W}{V} \cos \alpha \cos \beta_0 - \frac{V_Y}{V} \sin \beta_0 \text{ и, аналогично, } \cos \varphi_k = \frac{W}{V} \cos \alpha \cos \beta_k - \frac{V_Y}{V} \sin \beta_k.$$



$$F_{D0} = \frac{2}{\lambda} [W \cos \alpha \cos \beta_0 - V_H \sin \beta_0] = \frac{2}{\lambda} W \cos \alpha \cos \beta_0 - \frac{2}{\lambda} V_H \sin \beta_0; \quad (4)$$

$$F_{Dk} = \frac{2}{\lambda} [W \cos \alpha \cos \beta_k - V_H \sin \beta_k] = \frac{2}{\lambda} W \cos \alpha \cos \beta_k - \frac{2}{\lambda} V_H \sin \beta_k. \quad (5)$$

Из (5) выражается компонента $\frac{2}{\lambda} W \cos \alpha = \frac{1}{\cos \beta_k} \left(F_{Dk} + \frac{2}{\lambda} V_H \sin \beta_k \right)$.

При ее подстановке в выражение (4)

$$\begin{aligned} F_{D0} &= \frac{\cos \beta_0}{\cos \beta_k} \left(F_{Dk} + \frac{2}{\lambda} V_H \sin \beta_k \right) - \frac{2}{\lambda} V_H \sin \beta_0 = \\ &= \frac{\cos \beta_0}{\cos \beta_k} F_{Dk} + \frac{2}{\lambda} V_H \left[\frac{\cos \beta_0}{\cos \beta_k} \sin \beta_k - \sin \beta_0 \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что при наличии двух измерений/оценок ДЧ F_{D0} и F_{Dk} , соответствующих двум косвенно измеренным (через НЗС и высоту) углам наклона β_0 и β_k в границах ГЛ, возможно получение информации о вертикальной скорости V_H :

$$V_H = \frac{\lambda}{2} \left(F_{D0} - \frac{\cos \beta_0}{\cos \beta_k} F_{Dk} \right) \left[\frac{\cos \beta_0}{\cos \beta_k} \sin \beta_k - \sin \beta_0 \right]^{-1}. \quad (7)$$

В общем случае, если присутствуют более двух рассредоточенных измерений/оценок ДЧ, то по комбинациям из N пар $(F_{Di}; F_{Dj})$ при $i \neq j$ на основе соотношений вида (7) получается выборка значений вертикальной скорости $\{V_{H(n)}, n=1, \dots, N>3\}$, на основе которой может быть выполнено статистическое оценивание, например, с использованием процедуры усреднения:

$$V_H = V_{H\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V_{H(n)} \quad (8)$$

или других процедур непараметрического оценивания, например, рангового типа.

Примечание:

Следует отметить, что скорости $V_{H(n)}$, определяемые по соотношениям вида (7) имеют разную точность. Из всех этих значений аналитически может быть определена такая «лучшая пара» ДЧ $(F_{Di}; F_{Dj})$, $i \neq j$, при которой будет обеспечиваться наименьшее СКО для ошибок определения вертикальной скорости. Использование процедуры (8) целесообразно, если расчетное СКО для ошибок среднего значения будет существенно меньше, чем расчетное наименьшее СКО для ошибок при «лучшей паре» частот.

Кроме того, используя полученное в (7) или (8) значение скорости, выражение (6) при замене обозначения F_{D0} на $F_{D(0/k)}$ может использоваться для пересчета измеренной частоты F_{Dk} (при угле наклона β_k) в ее прогнозируемое значение $F_{D(0/k)}$ – в то значение ДЧ, которое было бы при угле наклона β_0 . В общем случае, из прогнозных ДЧ $F_{D(0/k)}$ при $k \geq 1$, полученных на по измерениям на основе ЛМА, и непосредственно измеренной по ГМА частоты F_{D0} формируется выборка значений ДЧ, приведенных к единому направлению – углу наклона β_0 для дискрета НЗС с ГМА. В этих прогнозных оценках «нелинейный дрейф» ДЧ в пределах рабочей зоны ППИ скомпенсирован. После такой частотной коррекции на основе выборки значений ДЧ уже представляется возможность корректного непараметрического оценивания ДЧ по направлению β_0 , например, в виде среднего значения



$$F_{D0ave} = \frac{1}{N+1} \left(F_{D0} + \sum_{i=1}^N F_{D0/i} \right), \quad (9)$$

где N – количество прогнозных ДЧ в выборке.

В ряде случаев, предполагая, что $|W| \gg |V_H|$, относительно малые значения углов β_0, β_k и их разницы ($\beta_0 - \beta_k$) в пределах узкого ГЛ, при прогнозе ДЧ вида (6) влияние вертикальной скорости может быть несущественным и при $V_H=0$ используется упрощенное выражение

$$F_{D0/k} = \left[\frac{\cos \beta_0}{\cos \beta_k} \right] F_{Dk},$$

причем абсолютная ошибка $\delta F_{D0/k}$ прогнознй оценки $F_{D0/k}$:

$$\begin{aligned} \delta F_{D0/k} &= \left[\frac{\cos \beta_0}{\cos \beta_k} \right] \delta F_{Dk} + F_{Dk} \left[\frac{\cos \beta_0 \sin \beta_k \delta \beta_k + \cos \beta_k \sin \beta_0 \delta \beta_0}{\cos^2 \beta_k} \right] = \\ &= \left[\frac{\cos \beta_0}{\cos \beta_k} \right] \delta F_{Dk} + F_{Dk} \left[\left(\frac{\cos \beta_0}{\cos \beta_k} \operatorname{tg} \beta_k \right) \delta \beta_k + \left(\frac{\sin \beta_0}{\cos \beta_k} \right) \delta \beta_0 \right], \end{aligned} \quad (10)$$

где δF_{Dk} – абсолютная погрешность измерения частоты F_{Dk} ; $\delta \beta_0$ и $\delta \beta_k$ – абсолютные ошибки при определении углов β_0 и β_k , вычисляемые по соотношениям вида (2). С учетом примечания к (2), при принятии ошибок для аргументов выражения (10) на уровне СКО (при $\delta F_{Dk} = \sigma_{FDk}$, $\delta \beta_0 = \sigma_{\beta_0}$, $\delta \beta_k = \sigma_{\beta_k}$) соотношение для расчета СКО $\sigma_{FD0/k}$ для ошибок прогноза (10):

$$\sigma_{FD0/k} = \sqrt{\left(\frac{\cos \beta_0}{\cos \beta_k} \right)^2 (\sigma_{FDk})^2 + \left(F_{Dk} \frac{\cos \beta_0}{\cos \beta_k} \operatorname{tg} \beta_k \right)^2 (\sigma_{\beta_k})^2 + \left(F_{Dk} \frac{\sin \beta_0}{\cos \beta_k} \right)^2 (\sigma_{\beta_0})^2}.$$

Следует отметить, что что целесообразность применения процедуры (9) определяется условием, что СКО σ_{FD0ave} для ошибок результата усреднения будет меньше, чем СКО σ_{FD0} для ошибок непосредственного измерения частоты по ГМА, т. е.

$$\sigma_{FD0ave} = \frac{1}{(N+1)} \sqrt{(\sigma_{FD0})^2 + \sum_{i=1}^N (\sigma_{FDi})^2} < \sigma_{FD0}.$$

Информативным параметром также является и разность измеренных частот $\Delta F_{D0/k}$

$$\begin{aligned} \Delta F_{D0/k} &= F_{D0} - F_{Dk} = \frac{2}{\lambda} W \cos \alpha [\cos \beta_0 - \cos \beta_k] + \frac{2}{\lambda} V_H [\sin \beta_k - \sin \beta_0] = \\ &= \frac{4}{\lambda} W \cos \alpha \left(\sin \frac{\beta_k + \beta_0}{2} \sin \frac{\beta_0 - \beta_k}{2} \right) + \frac{4}{\lambda} V_H \sin \frac{\beta_k - \beta_0}{2} \cos \frac{\beta_k + \beta_0}{2}. \end{aligned} \quad (11)$$

В ситуациях, когда влияние вертикальной скорости можно считать несущественным (например, при $V_H \approx 0$), по одной «паре» измерений возможно определение путевой скорости:

$$W = \frac{\lambda}{4} \Delta F_{D0/k} \left[\cos \alpha \left(\sin \frac{\beta_k + \beta_0}{2} \sin \frac{\beta_0 - \beta_k}{2} \right) \right]^{-1}.$$

При наличии не менее двух разностей частот значения путевой W и вертикальной V_H



скоростей определяются из разрешения системы уравнений на основе соотношений вида (11).

Заключение

Таким образом, в сигналах от земли по направлению главного луча РЛС, традиционно считающихся «мешающими» отражениями, в пределах одного периода повторения импульсов присутствует эффект нелинейного дрейфа амплитудного максимума доплеровского сигнала в зависимости от положения рассматриваемого дискрета неоднозначной задержки в периоде. Этот эффект, с одной стороны, может быть компенсирован на основе предложенных процедур частотной коррекции, чем обеспечивается инвариантность и возможность статистической обработки множества частотно-временных измерений по разным направлениям в пределах главного луча – для повышения точности определения проекции скорости на уточненное направление в главном луче. С другой стороны, этот эффект может использоваться и для повышения информативности при обработке отражений по главному лучу, обеспечивая при этом возможность измерения/оценивания вертикальной и путевой скоростей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 22-19-00058.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chernodarov A. V., Patrikeev A. P., Kovregin V. N., Kovregina G. M. Using an inertial satellite navigation system for determination of motion parameters of the radar antenna phase center // 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Proceedings. – Saint Petersburg, 2016. – P. 315-323.
2. Чернодаров, А. В. Инерциально-спутниковая система микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой и доплеровским каналом измерения траекторной скорости. / А. В. Чернодаров, В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина // Сборник материалов «XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам». – Санкт-Петербург, 2023. – С. 38-40 с.
3. Коврегин, В. Н. Автономная коррекция микронавигационной системы авиационного радара при организованных радиопомехах спутниковой навигации / В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 4(38). – С. 54 – 63. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-4-54-63.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коврегин Валерий Николаевич –

доцент, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: kovregin@mail.ru

Коврегина Галина Михайловна –

доцент, кандидат технических наук
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: g_kovregina@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kovregin Valery Nikolaevich –

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: kovregin@mail.ru



Kovregina Galina Mikhailovna –

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: g_kovregina@mail.ru