



ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА СОПУТСТВУЮЩИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ СИСТЕМЫ МИКРОНАВИГАЦИИ РАДАРА С КВАЗИНЕПРЕРЫВНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Т. В. Заяц, В. Н. Коврегин

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Показаны возможности применения, потенциальные точностные характеристики и результаты моделирования алгоритма радиолокационных микронавигационных измерений, реализуемых «на фоне» решения радаром задач обзора воздушного пространства в режиме квазинепрерывного излучения. Такие сопутствующие измерения обеспечивают расширение функциональных возможностей радара в аспекте его информативности и возможности использования в качестве помехоустойчивого достаточно точного корректирующего канала для типовой системы микронавигации РЛС, функционирующей в условиях радиопомех.

Ключевые слова: авиационный радар; квазинепрерывное излучение; отражения от земли по главному лучу, микронавигация.

Для цитирования:

Заяц, Т. В. Исследование алгоритма сопутствующих радиолокационных измерений для коррекции системы микронавигации радара с квазинепрерывным излучением / Т. В. Заяц, В. Н. Коврегин // Системный анализ и логистика. – 2024. – № 1(39). – с. 17 – 29. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-1-17-29.

RESEARCH OF THE ALGORITHM OF COMBINED RADAR MEASUREMENTS FOR CORRECTION OF THE MICRONAVIGATION SYSTEM OF RADAR WITH QUASI-CONTINUOUS RADIATION

T. V. Zayats, V. N. Kovregin

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The possibilities of application, potential accuracy characteristics and simulation results of the algorithm for radar micronavigation measurements, implemented “against the background” of solving airspace survey problems in the radar in the quasi-continuous radiation mode, are shown. Such accompanying measurements provide expansion of the functionality of the radar in terms of its information content and the possibility of using it as a noise-resistant, fairly accurate correction channel for a typical micronavigation system in the radar structure operating in conditions of radio interference.

Keywords: aviation radar; quasi-continuous radiation; reflections from the ground in the main beam of the radiation pattern, micronavigation.

For citation:

Zayats, T. V. Research of the algorithm of combined radar measurements for correction of the micronavigation system of radar with quasi-continuous radiation / T. V. Zayats, V. N. Kovregin // System analysis and logistics. – 2024. – № 1(39). – p. 17 – 29. DOI: 10.31799/2077-5687-2024-1-17-29.

Введение

Структура современных multifunctional РЛС авиационного базирования, как правило [1-3 и др.], включает специализированную инерциально-спутниковую систему для определения параметров траектории фазового центра (ФЦА) и ориентации главного луча (ГЛ) диаграммы направленности антенны в нормальной земной системе координат (НЗСК), фиксируемой и переназначаемой на относительно коротких временных интервалах. Такие системы (далее по тексту – «системы микронавигации») (СМН) в условиях продолжительных организованных радиопомех для спутниковых навигационных систем (СНС), нарушающих их работоспособность/снижающих достоверность данных СНС, фактически функционируют в автономном (инерциальном) режиме и при этом очень быстро теряют точность и становятся практически неработоспособными. Это существенно снижает эффективность РЛС при решении задач обзора земной поверхности и воздушного пространства. На данный момент можно считать типичной такую сложную сигнально-шумовую/помеховую обстановку – с



длительным воздействием радиопомех на каналы СНС, являющиеся позиционно-скоростным корректором для инерциального канала СМН. Например, на рис. 1 показано зафиксированное приемником СНС в СМН количество спутников при длительном реальном полете: а) с признаками достоверности позиционно-скоростных данных СНС (зеленый цвет); б) при отсутствии признаков (красный). На «красных участках» уже через 2-3 минуты автономной работы СМН «накапливала» ошибки, критичные для РЛС в задачах землеобзора с высоким разрешением, а также и в ряде задач обзора воздушного пространства.

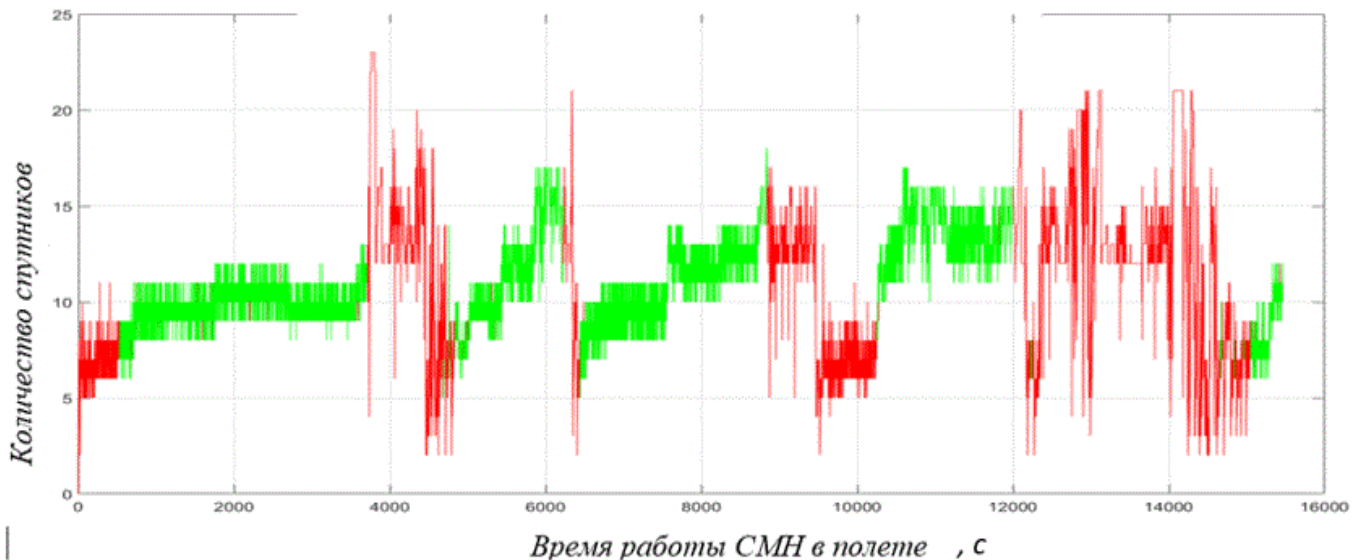


Рис. 1. Количество спутников, регистрируемых в приемнике СНС с признаками (зеленый цвет) и без признаков (красный) достоверности информации при длительном функционировании СМН в полете

Следовательно, обеспечение помехоустойчивой и достаточно точной коррекции СМН является *актуальной проблемой*, имеющей в настоящее время важное практическое значение.

Одним из направлений в решении этой проблемы считается [1, 4, 5 и др.] применение самой РЛС как датчика (микро)навигационной информации, в т. ч. используемой в задаче скоростной коррекции СМН. Известны различные способы измерения радиальных скоростей и тракторной скорости в РЛС в режимах низкой частоты повторения импульсов (ЧПИ), в т. ч. выполняемые одновременно с задачей землеобзора [4,5]. Однако критичная для СМН помеховая ситуация («красные участки» на рис.1) может возникать и в процессе решения задач класса «воздух-воздух»: поиска, наблюдения/сопровождения воздушных целей, в т. ч. и на фоне земной поверхности. В таких задачах РЛС обычно [1] используется квазинепрерывное излучение (КНИ) – со средней, высокой-средней и высокой ЧПИ, при которых указанные выше способы не могут применяться. В работах [6,7 и др.] показаны подходы и методы для измерения радиальной скорости ФЦА/наклонной дальности от ФЦА до земли при КНИ – по сигналам от ограниченного участка земной поверхности, облучаемого ГЛ. Применение этих методов, в общем случае, предполагает ориентацию оси ГЛ с углом наклона $\beta = (-\beta_{УМ})$, где $\beta_{УМ}$ – угол места оси ГЛ, превышающим половинную ширину ГЛ в вертикальной плоскости. При работе РЛС возможны ситуации: 1) выполняется целенаправленное управление направлением ГЛ и параметрами излучения пачки импульсов – в интересах повышения точности измерений микронавигационных (МН) параметров; 2) направление ГЛ/параметры пачки – это входные данные для процедур МН измерений, определяемые внешним управляющим алгоритмом РЛС, исходя из логики и требований основной задачи РЛС, решаемой на данный момент. Ситуация 1) возможна при наличии «свободного» времени в РЛС для излучения в нужном направлении «специальной» пачки для МН измерений (МН-пачки), т. е. когда РЛС не задействована в



основной задаче или же когда МН-пачка «встроена» в циклограмму решения основной задачи. В ситуации 2) осуществляется только проверка текущей ориентации/параметров КНИ по критериям, определяющим возможность/целесообразность использования сигналов от земли при такой пачке для МН измерений.

Цель работы – представление основных результатов аналитического исследования и моделирования алгоритма МН измерений (радиальной скорости ФЦА/дальности до земли) при КНИ в вышеуказанных ситуациях и предложений по дальнейшему развитию алгоритмов МН измерений (в аспектах повышения точности/помехоустойчивости) и эффективному использованию МН измерений для коррекции СМН в условиях радиопомех СНС.

Основная часть

При постановке задачи МН-измерений, в общем случае, предполагается информационное взаимодействие РЛС, функционирующей в режиме КНИ, и СМН радара, функционирующей в штатном инерциально-спутниковом режиме или в инерциальном режиме – при нарушении работоспособности/достоверности данных СНС-каналов СМН из-за радиопомех. В типовой СМН формируются текущие данные о траекторных параметрах ФЦА (ускорение, скорость, координаты, включая геодезическую и геометрическую высоты) и параметрах ориентации (углов и угловых скоростей) носителя в геодезической (навигационной) и в остановленной нормальной земной (микронавигационной) системах координат. От РЛС доступны данные об угловой половинной ширине ГЛ по азимуту $\Delta\alpha$ и вертикальной плоскости $\Delta\beta$ при определенной ориентации оси (направления максимума) ГЛ по азимуту α и углу наклона β – в сопровождающем трехграннике *ONEH* геодезической системы координат или в нормальной земной системе координат *OXYZ*. В рассматриваемой фазированной антенной решетке в ГЛ ДНА $\Delta\beta$ составляет несколько градусов, ширина $\Delta\alpha$ в несколько раз меньше и в некоторых при аналитическом исследовании может не учитываться. Как типовой режим КНИ понимается излучение пачки коротких импульсов с длительностью $\tau_{pulse} \approx 1$ мкс и периодом повторения импульсов (ППИ) $T_r = 1/F_r$, где F_r – ЧПИ, в диапазоне \approx от 15 до 30 мкс. Количество импульсов в пачке – база для быстрого преобразования Фурье – $N_{FFT} = 2028; 4096; 8192$.

Рассматривается предложенный в работе [7] метод МН измерений при типовом КНИ, предполагающий адаптивно-робастного управления параметрами ориентации оси ГЛ и КНИ, задаваемых РЛС перед излучением пачки импульсов, используемой для таких измерений (далее по тексту – МН-пачки). Такое управление предполагает первоначальное «прицеливание» с использованием текущих данных СМН: по дальностям/углам наклона по направлениям оси ГЛ, «верхней» и «нижней» границ ГЛ; по положению центральной доплеровской частоты (ДЧ) и границ спектра доплеровского эхосигнала от облучаемого ГЛ от участка земной поверхности (далее по тексту – «след ГЛ»).

При этом, с учетом погрешностей СМН и ошибок реализации заданного направления ГЛ, определялся такой угол наклона оси ГЛ β и/или ППИ T_r , при которых:

- a)* сигнал от полосы дальности в границах следа ГЛ, соответствующей реальному углу β_p наклона оси ГЛ, гарантированно будет иметь неоднозначную задержку сигнала (НЗС) τ , находящуюся в рабочей зоне ППИ (рис. 2);

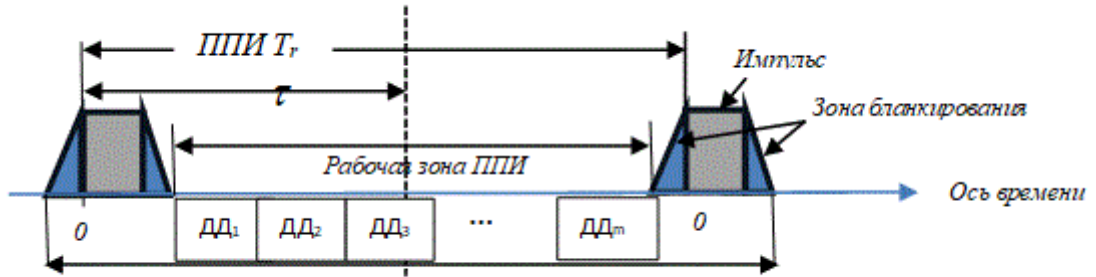


Рис. 2. Рабочая зона, зоны бланкирования, положение НЗС в рабочей зоне ППИ для дальности по направлению максимума (оси) ГЛ, где ДД₁...ДД_n – дискрет измерения НЗС/неоднозначной дальности

б) суперпозиция спектров сигналов от нескольких таких полосок, дистанцированных на расстояния, кратные ППИ, наблюдаемая в итоговом спектре для каждого дискрета НЗС в ППИ, гарантированно не оказывает влияние на положение глобального максимума амплитуды сигнала среди выявляемых максимумов амплитуды по всем дискретам НЗС в ППИ.

Это обеспечивается либо устранением самой возможности суперпозиции спектров, либо созданием условий, когда в рамках ППИ для дальности по направлению оси ГЛ происходит наложение спектров соседних ППИ, которые имеют относительно малую интенсивность. На рис. 3 условно иллюстрируется ситуация, когда глобальный максимум по оси ГЛ фактически не подвержен влиянию суперпозиции спектров сигналов от нескольких полос дальности и в итоговом спектре будет том же дискрете НЗС, что и без «наложения» спектров эхосигналов.

Рис. 3. Глобальный амплитудный максимум по направлению оси ГЛ в ППИ с индексом $r=1$ и при дискрете НЗС τ , устойчивый к эффектам суперпозиции спектров по ППИ с индексами $r=0, 1, 2$

Когда поз. а) и б) выполняются, то по глобальному максимуму амплитуды после БПФ в определенном фильтре шириной $\Delta f_D = F_r/N_{FFT}$, выявленному в конкретном дискрете НЗС шириной $d\tau = \tau_{pulse}/k$ ($k=1, \dots, 4$ – коэффициент «скользящего» суммирования внутри ППИ), определяются оценки:

- доплеровской частоты F_D и радиальной скорости ФЦА $V_R = \lambda F_D/2$, где λ – длина волны, в проекции по направлению к полосе в следе БЛ, эхосигнал которой дает глобальный максимум амплитуды;
- НЗС τ в ППИ T_r и дальности R по направлению полоске с глобальным максимумом в следе ГЛ $R = c/2(r T_r + \tau)$, где c – скорость радиоволны; r – индекс ППИ, который априорно точно определен с использованием по данным от СМН и РЛС.

Потенциальная точность измерения/оценивания указанных параметров, в основном, зависит от ширины доплеровского фильтра и дискрета НЗС, т. е. от инструментальных ошибок из-за дискретизации. Среднеквадратическое отклонение (СКО) σ_τ для ошибок дискретных измерений НЗС, а также СКО σ_R для ошибок определения дальности R :

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{(d\tau)^2}{12}} = \sqrt{\frac{(\tau_{pulse})^2}{12k^2}} = \frac{\tau_{pulse}}{2k} \sqrt{\frac{1}{3}} \approx 0.289 \frac{\tau_{pulse}}{k}; k = 1, 2, 3, 4; \quad (1)$$

$$\sigma_R = \frac{c}{2} \sigma_\tau. \quad (2)$$



Аналогично, СКО σ_{FD} для инструментальной погрешности определения ДЧ по глобальному максимуму ($F_D = F_{Dmax}$) и СКО σ_{VR} для ошибок определения радиальной скорости V_R :

$$\sigma_{FD} = \sqrt{\frac{(\Delta f_D)^2}{12}} = \frac{\Delta f_D}{2} \sqrt{\frac{1}{3}} \approx 0.289 \Delta f_D; \quad (3)$$

$$\sigma_{VR} = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{(\Delta f_D)^2}{12}} = \frac{\lambda}{4} \Delta f_D \sqrt{\frac{1}{3}} \approx 0.1445 (\lambda \Delta f_D). \quad (4)$$

Например, при типичном значении $\tau_{pulse} = 1$ мкс СКО $\sigma_R \approx (43,35$ м; 21,68 м; 14,45 м; 10,84 м) при $k = (1;2;3;4)$, соответственно. При типичной ЧПИ в диапазоне 40...70 кГц и базах БПФ (2048; 4096; 8192) ширина фильтра $\approx (20;10;5) \dots (34;17;8,5)$ Гц, что при $\lambda=0,03$ м дает значения СКО $\sigma_{VR} \approx (0,09; 0,04; 0,02)$ м/с... $\approx (0,15; 0,07; 0,035)$ м/с, соответственно.

Очевидно, что повышение точности измерения/оценки дальности возможно при уменьшении длительности импульса ($\downarrow \tau_{pulse}$), снижении ширины дискрета $d\tau$ при внутрипериодной обработке ($\uparrow k$). Улучшение же точности измерения/оценивания скорости возможно при снижении ЧПИ ($\downarrow F_r$), увеличении количества импульсов в пачке ($\uparrow N_{FFT}$), уменьшении длины волны ($\downarrow \lambda_r$). Однако, практическая реализация таких «экстенсивных» направлений повышения точности измерений во многих случаях затруднена из-за ограничений по аппаратуре РЛС, вычислительному ресурсу, длительности излучения и др.

Первоначальная оценка положения «центральной» ДЧ F_{D0} по направлению оси ГЛ и границ спектра доплеровского сигнала в рамках определяется с использованием данных от СМН и РЛС следующим образом:

$$F_{D0} = \frac{2}{\lambda} V_{R0} = \frac{2}{\lambda} V_0 \cos \varphi_0, \quad (5)$$

где

$$\cos \varphi_0 = \cos \varphi_{NV} \cos \varphi_{0NMB} + \cos \varphi_{EV} \cos \varphi_{0EMB} + \cos \varphi_{HV} \cos \varphi_{0HMB} \quad (6)$$

– косинус угла между вектором тракторной скорости ФЦА с модулем V_0 и направлением оси ГЛ;

$$\cos \varphi_{NV} = \frac{V_{0N}}{V_0}, \cos \varphi_{EV} = \frac{V_{0E}}{V_0}, \cos \varphi_{HV} = \frac{V_{0H}}{V_0} - \text{направляющие косинусы для вектора}$$

тракторной скорости, определяемые в СМН в проекциях на оси сопровождающего трехгранника $ONEH$ в геодезической системе координат; $\cos \varphi_{0NMB}, \cos \varphi_{0EMB}, \cos \varphi_{0HMB}$ – направляющие косинусы оси ГЛ, которые также известны и, например, могут быть выражены через азимутальный угол α_{0MB} (истинный курс, угол рысканья) и угол наклона β_{0MB} ($90^\circ > \beta_{0MB} > 0^\circ$) оси ГЛ в $ONEH$:

$$\cos \varphi_{0NMB} = \cos \alpha_{0MB} \cos \beta_{0MB}; \cos \varphi_{0EMB} = \sin \alpha_{0MB} \cos \beta_{0MB}; \cos \varphi_{0HMB} = -\sin \beta_{0MB}. \quad (7)$$

При известной половинной ширине ГЛ по азимуту $\Delta\alpha$ и углу наклона $\Delta\beta$ по выражениям вида (7) определяются направляющие косинусы для направлений по нижней и верхней кромке ГЛ:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{\max NMB} &= \cos(\alpha_{0MB} + \Delta\alpha) \cos(\beta_{0MB} + \Delta\beta); \\ \cos \varphi_{\max EMB} &= \sin(\alpha_{0MB} + \Delta\alpha) \cos(\beta_{0MB} + \Delta\beta); \cos \varphi_{\max HMB} = -\sin(\beta_{0MB} + \Delta\beta); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{\min NMB} &= \cos(\alpha_{0MB} - \Delta\alpha) \cos(\beta_{0MB} - \Delta\beta); \\ \cos \varphi_{\min EMB} &= \sin(\alpha_{0MB} - \Delta\alpha) \cos(\beta_{0MB} - \Delta\beta); \cos \varphi_{\min HMB} = -\sin(\beta_{0MB} - \Delta\beta). \end{aligned} \quad (9)$$



По выражению вида (6) определяются косинусы для максимального φ_{\max} и минимального φ_{\min} значений угла между вектором скорости ФЦА и направлениями по нижней (с наибольшим углом наклона) и верхней границе ГЛ (с наименьшим углом наклона), а по соотношению вида (5) соответственно рассчитываются минимальное $F_{D\min}$ и максимальное $F_{D\max}$ значения ДЧ:

$$\cos \varphi_{\max} = \cos \varphi_{NV} \cos \varphi_{\max NMB} + \cos \varphi_{EV} \cos \varphi_{0EMB} + \cos \varphi_{HV} \cos \varphi_{\max HMB}; \quad (10)$$

$$\cos \varphi_{\min} = \cos \varphi_{NV} \cos \varphi_{\min NMB} + \cos \varphi_{EV} \cos \varphi_{\min EMB} + \cos \varphi_{HV} \cos \varphi_{\min HMB}; \quad (11)$$

$$F_{D\min} = \frac{2}{\lambda} V_{R\min} = \frac{2}{\lambda} V_0 \cos \varphi_{\max}; F_{D\max} = \frac{2}{\lambda} V_{R\max} = \frac{2}{\lambda} V_0 \cos \varphi_{\min}. \quad (12)$$

Примечание: Погрешность оценивания ДЧ в (5) и (12) зависит от точности СМН по скорости и углам ориентации. Например, абсолютная ошибка δ_{FD0} определения центральной ДЧ по оси ГЛ (5), выраженная через абсолютные ошибки δ_{V0} и δ_{φ_0} определения траекторной скорости V_0 и угла φ_0 :

$$\delta_{FD0} = \frac{2}{\lambda} [V_0 \sin \varphi_0 \delta_{\varphi_0} + \cos \varphi_0 \delta_{V_0}].$$

Аналогично и для ДЧ (12). Здесь и далее абсолютная погрешность рассматривается как максимальный по модуль ошибки, приближенно равный трем СКО.

По значениям ДЧ из (12), с учетом предполагаемых погрешностей СМН по скорости и по углам ориентации ГЛ с «запасом» определяется рабочий диапазон частот/номеров фильтров для МН измерений, что позволяет исключить/снизить влияние «мешающих» отражений от земли по боковым лепесткам путем режекторной фильтрации.

Следует отметить, что ширина доплеровского спектра для конкретного наблюдаемого дискрета НЗС может варьироваться в диапазоне $[F_{D\min}; F_{D\max}]$, рассчитанном для всего ГЛ, в зависимости от количества полос на следе ГЛ, «задействованных» при суперпозиции и формировании итогового спектра в конкретном рассматриваемом дискрете НЗС.

При дискрете НЗС в ППИ T_r , соответствующем значению НЗС $\tau = const$, для известной высоты H , и при разных индексах ППИ r_i определяются значения дальностей R_i до всех полос земли в границах следа ГЛ, «участвующих» в итоговом спектре для этого дискрета НЗС и соответствующие им углы наклона β_i :

$$R_i = \frac{H}{\sin \beta_i} = \frac{c}{2} [r_i T_r + \tau], \quad (13)$$

$$\beta_i = \arcsin \frac{2H}{r_i T_r + \tau} \quad (14)$$

должны отвечать условиям

$$R_{\min} = \frac{H}{\sin \beta_{\max}} \leq R_i \leq R_{\max} = \frac{H}{\sin \beta_{\min}} \quad (15)$$

или

$$\beta_{\min} \leq \beta_i \leq \beta_{\max}. \quad (16)$$

На рис. 4 показаны результаты моделирования при высоте ФЦА $H=800$ м, когда максимальная расчетная дальность (16) при $T_r=23$ мкс из выражения (13) дает НЗС $\tau \approx 19.23$ мкс (26-й дискрете НЗС в рабочей ППИ). В рамках ширины ГЛ по углу наклона (красный цвет)



есть 10 значений дальности вида (13) при разных индексах ППИ r_i и соответствующих углов наклона $[1.228080^\circ; 1.353075^\circ; 1.506399^\circ; 1.698919^\circ; 1.947869^\circ; 2.282327^\circ; 2.755505^\circ; 3.476349^\circ; 4.708539^\circ; 7.297517^\circ]$, отвечающих условиям (15), (16) и показанных на рис. 3 синим цветом. Видно, что диапазон таких углов может быть меньше ширины ГЛ и, соответственно, меньше будет и ширина доплеровского спектра. Для каждого дискрета НЗС в зависимости от его положения в ППИ целесообразно корректировать расчетные границы спектра (12) с учетом (13) - (16), т. е. в «привязке» к оценке НЗС для этого дискрета НЗС, например, к положению его середины ($d\tau/2$) в рабочей зоне ППИ.

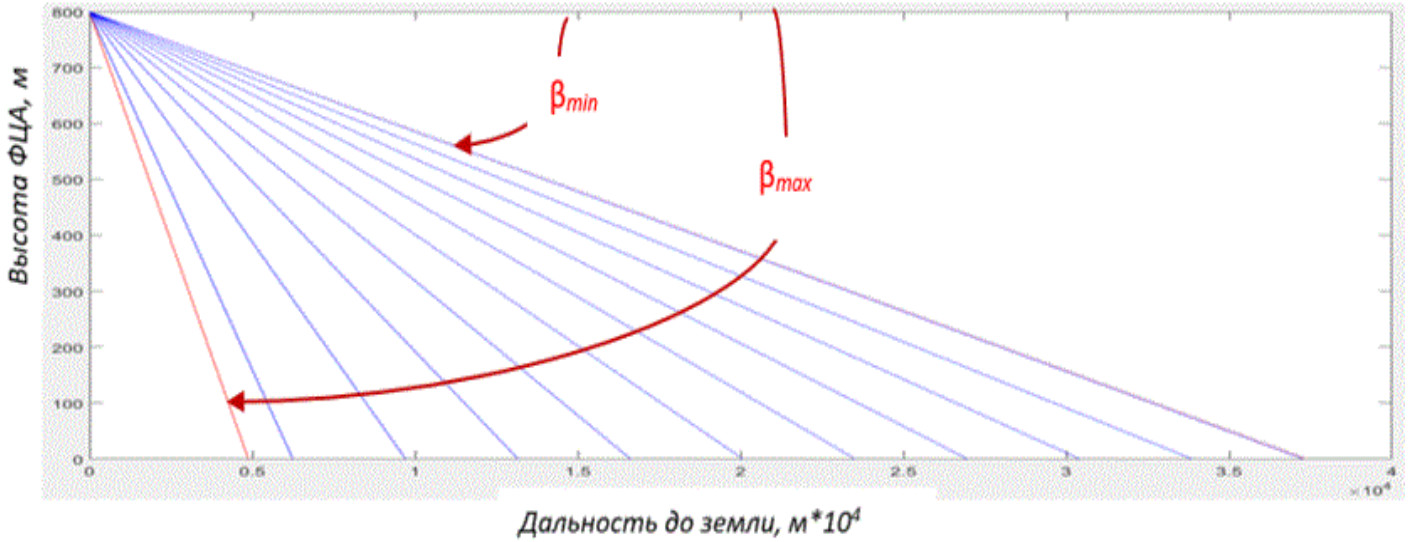


Рис. 4. Углы наклона в пределах ширины ГЛ на дальностях с фиксированной НЗС, кратных $0,5cT_r$

Разность доплеровских частот вида (5), рассматриваемых для двух полос дальности с фиксированной НЗС и разными индексами ППИ $r_{(k)}=k > r_{(j)}=j$ при углах $\varphi_{(k)} < \varphi_{(j)}$:

$$\Delta F_{D(k,j)} = F_{D(k)} - F_{D(j)} = \frac{2}{\lambda} V_0 [\cos \varphi_{(k)} - \cos \varphi_{(j)}] = \frac{2}{\lambda} V_0 \left[2 \sin \frac{\varphi_{(k)} + \varphi_{(j)}}{2} \sin \frac{\varphi_{(j)} - \varphi_{(k)}}{2} \right]. \quad (17)$$

С учетом выражений (7) и (6):

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{(k)} &= \cos \varphi_{NV} \cos \alpha_{0MB} \cos \beta_{MB(k)} + \cos \varphi_{EV} \sin \alpha_{0MB} \cos \beta_{MB(k)} + \cos \varphi_{HV} (-\sin \beta_{MB(k)}) = \\ &= [\cos \varphi_{NV} \cos \alpha_{0MB} + \cos \varphi_{EV} \sin \alpha_{0MB}] \cos \beta_{MB(k)} - \cos \varphi_{HV} \sin \beta_{MB(k)}; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\cos \varphi_{(j)} = [\cos \varphi_{NV} \cos \alpha_{0MB} + \cos \varphi_{EV} \sin \alpha_{0MB}] \cos \beta_{MB(j)} - \cos \varphi_{HV} \sin \beta_{MB(j)}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Delta F_{D(k,j)} &= \frac{2}{\lambda} V_0 ([\cos \varphi_{NV} \cos \alpha_{0MB} + \cos \varphi_{EV} \sin \alpha_{0MB}] (\cos \beta_{MB(k)} - \cos \beta_{MB(j)}) + \cos \varphi_{HV} (\sin \beta_{MB(j)} - \sin \beta_{MB(k)})) = \\ &= \frac{4}{\lambda} V_0 [\cos \varphi_{NV} \cos \alpha_{0MB} + \cos \varphi_{EV} \sin \alpha_{0MB}] \sin \frac{\beta_{MB(j)} - \beta_{MB(k)}}{2} \left(\sin \frac{\beta_{MB(k)} + \beta_{MB(j)}}{2} + \cos \varphi_{HV} \cos \frac{\beta_{MB(j)} + \beta_{MB(k)}}{2} \right). \end{aligned} \quad (20)$$

Если траекторная скорость ФЦА не имеет вертикальной составляющей, т. е. при $\cos \varphi_{HV} = 0$, при равенстве скорости V_0 значению путевой скорости ФЦА W , то выражение (20) имеет вид



$$\begin{aligned}\Delta F_{D(k,j)} &= \frac{2}{\lambda} V_0 \left([\cos \varphi_{NV} \cos \alpha_{0MB} + \cos \varphi_{EV} \sin \alpha_{0MB}] (\cos \beta_{MB(k)} - \cos \beta_{MB(j)}) \right) = \\ &= \frac{4}{\lambda} V_0 \left([\cos \varphi_{NV} \cos \alpha_{0MB} + \cos \varphi_{EV} \sin \alpha_{0MB}] \sin \frac{\beta_{MB(j)} - \beta_{MB(k)}}{2} \sin \frac{\beta_{MB(k)} + \beta_{MB(j)}}{2} \right).\end{aligned}\quad (21)$$

В случае, когда горизонтальная проекция оси ГЛ совпадает с направлением вектора путевой скорости ФЦА, то при $V_0 = W$ выражение (21) упрощается:

$$\Delta F_{D(k,j)} = \frac{2}{\lambda} V_0 (\cos \beta_{MB(k)} - \cos \beta_{MB(j)}) = \frac{4}{\lambda} V_0 \left(\sin \frac{\beta_{MB(j)} - \beta_{MB(k)}}{2} \sin \frac{\beta_{MB(k)} + \beta_{MB(j)}}{2} \right).\quad (22)$$

Если на момент начала излучения пачки импульсов назначить нормальную земную систему координат $OXYZ$, начало которой совпадает с текущим положением ФЦА, ось OX совпадает с направлением путевой скорости, ось OY направлена вверх по вертикали (местной или геодезической), а ось OZ составляет с осями OX , OY «правую тройку» векторов, то выражение вида (5) в $OXYZ$ приобретает следующий вид:

$$F_{D0} = \frac{2}{\lambda} V_{R0} = \frac{2}{\lambda} [W \cos \beta_{0MB} + V_H \sin \beta_{0MB}],\quad (23)$$

где W - модуль вектора путевой скорости ФЦА; V_H - вертикальная проекция вектора траекторной скорости ФЦА в трехграннике $ONEH$, равная вертикальной проекции скорости в $OXYZ$ ($V_H = V_Y$). Тогда выражение (17) в $OXYZ$ имеет вид:

$$\begin{aligned}\Delta F_{D(k,j)} &= \frac{2}{\lambda} \left(W [\cos \beta_{MB(k)} - \cos \beta_{MB(j)}] + V_H [\sin \beta_{MB(k)} - \sin \beta_{MB(j)}] \right) = \\ &= \frac{2}{\lambda} \left(W \left[2 \sin \frac{\beta_{MB(k)} + \beta_{MB(j)}}{2} \sin \frac{\beta_{MB(j)} - \beta_{MB(k)}}{2} \right] + V_H \left[2 \sin \frac{\beta_{MB(j)} - \beta_{MB(k)}}{2} \cos \frac{\beta_{MB(j)} + \beta_{MB(k)}}{2} \right] \right) = \\ &= \frac{4}{\lambda} \left(W \sin \frac{\beta_{MB(k)} + \beta_{MB(j)}}{2} + V_H \cos \frac{\beta_{MB(j)} + \beta_{MB(k)}}{2} \right) \sin \frac{\beta_{MB(j)} - \beta_{MB(k)}}{2}.\end{aligned}\quad (24)$$

Таким образом, выражения вида (17), (20), (24) – при произвольной скорости ФЦА – или вида (22) – при отсутствии вертикальной компоненты скорости ФЦА – позволяют рассчитать отклонения «центральных» доплеровских частот сигналов от всех облучаемых ГЛ фрагментов поверхности, спектры которых при суперпозиции будут определять итоговый спектр, наблюдаемый в определенном дискрете НЗС в рабочей зоне ППИ. В то же время по данным СМН даже при их относительно невысокой точности по выражению вида (13) обеспечивается определение дальности до земли по текущему направлению оси ГЛ с точной оценкой индекса ППИ r_0 и с оценкой НЗС τ_0 , гарантирующей нахождение действительно НЗС в пределах «рабочей» зоны ППИ:

$$r_0 = \text{int} \left(\frac{2R_0}{cT_r} \right); \quad \tau_0 = \text{fract} \left(\frac{2R_0}{cT_r} \right),\quad (25)$$

где $\text{int}(\bullet)$ и $\text{fract}(\bullet)$ – взятие целой и дробной части числа. Аналогично без ошибок определяются и значения индексов ППИ r_{min} и r_{max} для минимальной и максимальной дальностей до земли в рамках ограниченного «следа» ГЛ. Тогда для каждого



рассматриваемого дискрета НЗС для известного диапазона индексов $[r_{min}, \dots, r_0, \dots, r_{max}]$ может определяться разность частот $\Delta F_{D(k,j)}$ при назначении $(k,j) \in [r_{min}, \dots, r_0, \dots, r_{max}]$, $\forall k > j$.

В выражениях (20) - (24) при $k = r_{max}$ и $j = r_{min}$ углы, выраженные как

$$\frac{\beta_{MB(k)} + \beta_{MB(j)}}{2} \approx \beta_0 \text{ и } \frac{\beta_{MB(j)} - \beta_{MB(k)}}{2} \approx \frac{\theta_\beta}{2} = \Delta\beta,$$

соответствуют текущему направлению оси ГЛ и половинной ширине ГЛ по углу наклона, считающейся априорно известной величиной. В выражениях (20) - (24), следовательно, как константа может рассматриваться величина:

$$\sin \frac{\beta_{MB(j)} - \beta_{MB(k)}}{2} = \sin \Delta\beta = const. \quad (25)$$

Для всего ГЛ применительно к конкретному дискрету НЗС в ППИ можно определить диапазон, в котором будет изменяться положение «центральных» ДЧ, формируемых разными полосками земли в зависимости от индексов ППИ, соответствующих их положению в «следе» ГЛ. Например, для ситуации, представленной на рис. 4, при $V_0=W=60$ м/с по соотношению (22) для вышеуказанных углов наклона в ГЛ с шириной $\Delta\beta \approx 4^\circ$ при $\lambda=0,03$ м разность ДЧ (рис. 5) не превышает $\approx 31,5$ Гц ($\approx 0,47$ м/с).

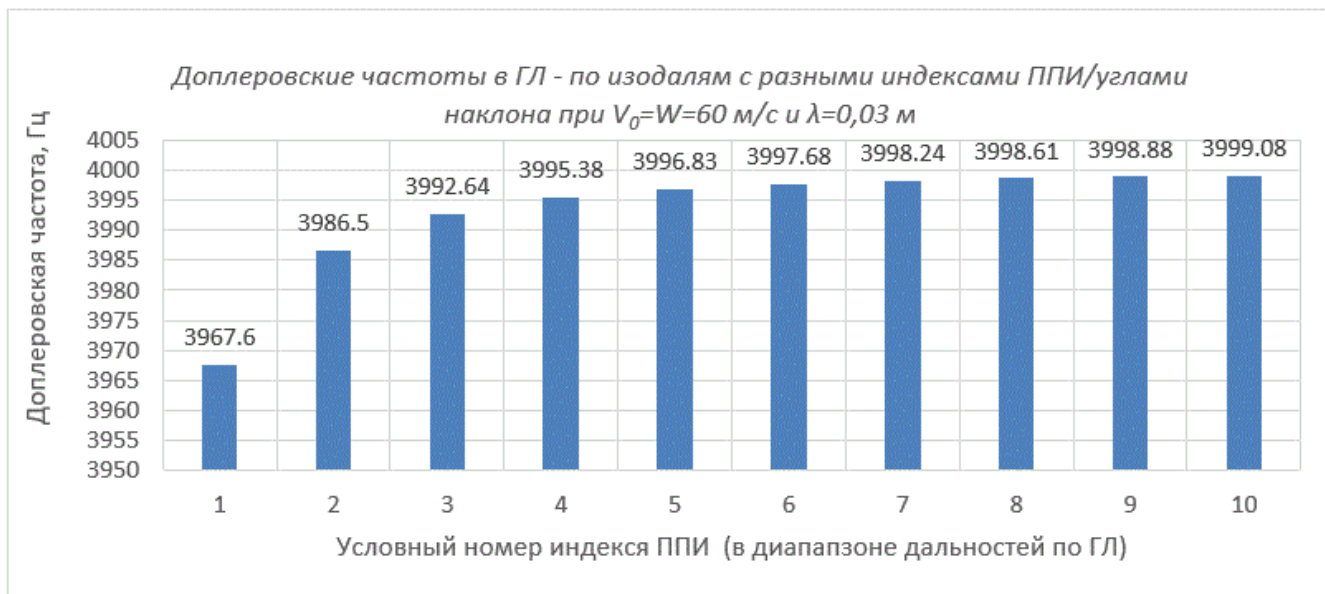


Рис. 5. Наблюдаемые в одном дискрете НЗС «центральные» ДЧ по сигналам от изодалей, соответствующих разным индексам ППИ и разнесенных на расстояния, кратные $(0,5cT_r)$

Следует отметить, что в данном случае при ЧПИ $F_r = 1/T_r \approx 43478$ Гц, базе БПФ $N_{FFT}=2048$ ширина доплеровского фильтра $\Delta f_D \approx 21$ Гц ($\approx 0,32$ м/с). Следовательно, отличия центральных ДЧ для изодалей с индексами от 2-10 (рис.4) фактически могут не проявляться, т. к. все ДЧ находятся в диапазоне, соответствующем одному номеру фильтра. «Соседнему» фильтру соответствует только одна ДЧ – для эхосигнала от ближайшей полоски дальности в границах «следа» ГЛ. В результирующем спектре для рассматриваемого дискрета НЗС будут два близлежащих максимума сигнала: один, полученный при суперпозиции спектров для изодалей с индексами 2-10; другой как максимум спектра сигнала от ближайшей изодали с индексом 1.



Таким образом, в результате суперпозиции сигналов от нескольких дистанцированных изодалей в границах следа ГЛ в спектре наблюдаемого дискрета НЗС могут присутствовать несколько максимумов амплитуды сигнала на разных частотах, значения которых нелинейно зависят от дальности до каждой такой изодали, выраженной в индексах ППИ. При типичной ширине доплеровского фильтра при больших дальностях эти значения не могут измеряться (рис. 5, участок кривой справа, близкий к линейной зависимости). Максимумы амплитуд сигналов от изодалей при их малых дальностях могут проявляться уже в разных фильтрах (рис. 5, участок кривой слева, с явно выраженной нелинейностью).

Если есть возможность различения соответствующих ДЧ (например, когда интервалы между ними составляют несколько фильтров), то измерения этих ДЧ и диапазоны между ними можно рассматривать как информативные. Например, по критерию «глобального максимума» амплитуды среди всех дискретов в рабочей зоне ППИ выделен конкретный номер дискрета, получена оценка НЗС τ , по которой при определенном по данным СМН индексе ППИ r_m измеряется дальность по направлению от ФЦА к той изодали в границах «следа» ГЛ, которая формирует глобальный максимум сигнала. По положению этого глобального максимума измеряется/оценивается ДЧ F_{Dm} , а с использованием измеренной дальности R_m вычисляется угол наклона β_m для вышеуказанного направления при известной высоте ФЦА над землей. Тогда при известных значениях угла β_m , индексов ППИ r_m , r_{min} и r_{max} для измеренной, максимальной и минимальной дальностей до земли в рамках ГЛ, могут быть:

- рассчитаны углы наклона $\beta_{(n)}$ для направлений до всех других изодалей (при $r_{(n)} \neq r_m$):

$$\beta_{(n)} = \arcsin \left[\frac{1}{\sin \beta_m} - \frac{c n T_r}{2 H} \right]^{-1}; n = (r_{(n)} - r_m) \neq 0; r_{(n)} \in [r_{min}; r_{max}]; \quad (26)$$

- определены отклонения частот $\Delta F_{(m,n)}$ от измеренной ДЧ F_{Dm} для всех частот $F_{D(n)}$ по направлениям с рассчитанными в (26) углами наклона $\beta_{(n)}$ – на основе одного из соотношений вида (20) - (24) – и получены прогнозные оценки $F^{*D(n)}$.

В том случае, если в рамках доверительного интервала, назначаемого с учетом ошибок частотных измерений и ошибок оценок $\Delta F_{(m,n)}$ и $F^{*D(n)}$, есть один или несколько различимых локальных максимумов амплитуды сигнала и соответствующие измерения/оценки ДЧ, то:

- 1) любое отклонение частот $\Delta F_{D(k,i)}$ полученное по измерениям $F_{D(k)}$ и $F_{D(j)}$ при $k \neq j$, включая $F_{D(k)} = F_{Dm}$, позволяет определить скоростные параметры ФЦА. Например, исходя из соотношения (22), при горизонтальном полете путевая скорость ФЦА $V_0 = W$:

$$V_0 = W = \frac{\lambda}{4} \Delta F_{D(k,j)} \left(\sin \frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} \sin \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} \right)^{-1}, \quad (27)$$

причем при нескольких ($M > 1$) различных нескольких комбинаций (k,j) и M значений скорости $V_{0(i)}$ ($i=2, \dots, M$) возможна и статистическая оценка скорости в виде среднего $V_{0\text{ave}}$, выборочной медианы $V_{0\text{med}}$ или других непараметрических оценок:

$$V_{0\text{ave}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_{0(i)}; \quad (28)$$

$$V_{0\text{med}} = \text{med}\{V_{0(i)}\}, V_{0(i)} \leq V_{0(i+1)} \forall i = 1, \dots, M - 1. \quad (29)$$

- 2) любая из измеренных ДЧ $F_{D(j)}$ может быть «приведена» ДЧ $F_{D(k)}$, т. е. спроецирована на направление с углом наклона $\beta_{(k)}$, используя расчетное отклонения $\Delta F_{(k,j)}$, т. е. приведенная к $\beta_{(k)}$ частота $F^{*D(k,j)}$, а также при нескольких приведенных частотах для



фиксированного $\beta_{(k)}$ может быть получена статистическая оценка, например, как усредненная ДЧ $F_{D(k) ave}$ по этому направлению:

$$F^*_{D(k,j)} = F_{D(j)} + \Delta F_{D(k,i)} ; \quad (28)$$

$$F_{D(k) ave} = \frac{1}{N+1} \left[F_{D(k)} + \sum_{j=1}^N F^*_{D(k,j)} \right]. \quad (30)$$

Абсолютная ошибка δV_0 определения скорости по соотношению (27)

$$\delta V_0 = \frac{\lambda}{4} \frac{A\delta_B + B\delta_A}{B^2} = \frac{\lambda}{4} \left[\frac{A\delta_B}{B^2} + \frac{\delta_A}{B} \right], \quad (31)$$

где $A = \Delta F_{D(k,j)}$ - измеренное отклонение частот;

$$\delta_A = \delta_{FD(k)} + \delta_{FD(j)} = 2\delta_{FD} \quad (32)$$

– абсолютная ошибка измеренного отклонения при равной абсолютной инструментальной ошибке измерения частот δ_{FD} ;

$$B = \left(\sin \frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} \sin \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} \right) - \text{ориентационная компонента в выражении (27),}$$

определяемая с абсолютной ошибкой δ_B , которая представляется в виде:

$$\begin{aligned} \delta_B &= \sin \frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} \cos \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} \delta_\beta + \sin \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} \cos \frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} \delta_\beta = \\ &= \delta_\beta \left[\sin \frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} \cos \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} + \sin \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} \cos \frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} \right] = \\ &= \delta_\beta \sin \left(\frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} + \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} \right) = \delta_\beta \sin \beta_{(j)}, \end{aligned} \quad (33)$$

где δ_β - абсолютная ошибка определения угла наклона, считающаяся одинаковой для всех углов в выражении (33). С учетом (27), (31) - (33), абсолютная ошибка по скорости:

$$\begin{aligned} \delta V_0 &= \frac{\lambda}{4} \frac{\Delta F_{D(k,j)} \delta_\beta \sin \beta_{(j)} + \left(\sin \frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} \sin \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} \right) 2\delta_{FD}}{\left(\sin \frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} \sin \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} \right)^2} = \\ &= \frac{\lambda}{4} \frac{\Delta F_{D(k,j)} \delta_\beta \sin \beta_{(j)}}{\left(\sin \frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} \sin \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} \right)^2} + \frac{\lambda}{4} \frac{2\delta_{FD}}{\left(\sin \frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} \sin \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} \right)} = \\ &= V_0 \frac{\delta_\beta \sin \beta_{(j)}}{\left(\sin \frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} \sin \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} \right)} + \frac{\lambda}{4} \frac{2\delta_{FD}}{\left(\sin \frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} \sin \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} \right)} = \end{aligned}$$



$$= \frac{1}{\left(\sin \frac{\beta_{(j)} - \beta_{(k)}}{2} \sin \frac{\beta_{(k)} + \beta_{(j)}}{2} \right)} \left[V_0 \delta_\beta \sin \beta_{(j)} + \frac{\lambda}{2} \delta_{F_D} \right]. \quad (34)$$

Следует отметить, что когда ширина следа ГЛ соответствует одному ППИ и спектр в каждом дискрете НЗС формируется только сигналам от одной полосы дальности, то также, по аналогии с (17), (20) - (24), могут быть определены отклонения центральных ДЧ (максимумов амплитуды), рассматриваемых во всех дискретах НЗС в рабочей зоне ППИ. При этом разница углов наклона для двух любых дискретов НЗС будет зависеть от интервала между ними, выраженного через ширину дискрета НЗС $d\tau = \tau_{pulse}/k$ в ППИ, Разница центральных ДЧ в двух соседних дискретах НЗС также будет нелинейно изменяться в зависимости от положения этой «пары» в ППИ, а максимальная разность ДЧ в рамках ППИ определяется разностью углов наклона для первого и последнего дискрета НЗС в рабочей зоне ППИ, ширина которой обычно составляет не менее 80...85% от длительности ППИ.

По измеренным значениям геометрической высоты ФЦА H и дальности R до полосы в следе ГЛ, соответствующей определенному дискрету и оценке НЗС τ , может быть получена оценка угла наклона β для направления к этой полосе (как косвенное измерение угла) по соотношению вида (14). При этом абсолютная погрешность $\delta\beta$ определения этого угла через абсолютные ошибки по дальности δR и высоте δH выражается в виде

$$\delta\beta = \left[\sqrt{1 - \left[\frac{H}{R} \right]^2} \right]^{-1} \left[\frac{H\delta R + R\delta H}{R^2} \right] = \frac{1}{\cos \beta} \left[\frac{\delta R \sin \beta + \delta H}{R} \right] = \frac{\delta R \operatorname{tg} \beta}{R} + \frac{\delta H}{R \cos \beta}. \quad (35)$$

Заключение

Полученные оценки потенциальной точности для исследуемого алгоритма измерения/оценивания радиальной скорости ФЦА/дальности до земли в направлении к полосе дальности в следе ГЛ, формирующей наиболее интенсивный эхосигнал, показывают целесообразность использования канала таких измерений для позиционно-скоростной/угловой коррекции системы микронавигации РЛС в условиях радиопомех, приводящих к неработоспособности корректирующих каналов от спутниковых навигационных систем

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по радиолокации / Под ред. М.И. Скольника: пер. с англ. под общ. ред. В. С. Вербы. – М.: Техносфера, 2015. – 672 с.
2. Чернодаров А. В., Коврегин В. Н., Коврегина Г. М. Инерциально-спутниковая система микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой и доплеровским каналом измерения траекторной скорости. // Сборник материалов «XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам». – Санкт-Петербург, 2023. – С. 38-40.
3. 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.
4. Красильщиков, М. М. К проблеме высокоточного позиционирования фазового центра антенны многофункциональной бортовой РЛС авиационного базирования / М. М. Красильщиков, Д. А. Козорез, К. И. Сыпало, О. Ф. Самарин, В. Ю. Севастьянов // Гироскопия и навигация. – 2013. – №2(81). – С. 14-30.



5. Севастьянов, В. Ю. Измерение скорости движения носителя в моноимпульском радиолокаторе с синтезированной апертурой антенны / В. Ю. Севастьянов, М. В. Степенев // Радиотехника и электроника. – 2007. – №8. Т.52. – С. 944-948.
6. Kovregin V., Kovregina G. Adaptive-robust methods for detecting, capturing and tracking hovering, low- and high-speed objects in integrated radar-inertial systems with quasi-continuous radiation // 28th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS) – Saint Petersburg, 2021. – P. 1-4. doi: 10.23919/ICINS43216.2021.9470845.
7. 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

Зяц Татьяна Васильевна –

магистрант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А

E-mail: t.v.zayts@onegroup.ru

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zayats Tatyana Vasilievna –

master's student

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia

E-mail: miss.zayatz@mail.ru

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