

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.57>

ИНФОРМАЦИОННО-АВТОНОМНЫЙ МЕТОД РАСШИРЕННЫХ МИКРОНАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В РАДАРАХ КВАЗИНЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ГЛАВНОГО ЛУЧА

Научная статья

Коврегин В.Н.^{1,*}, Коврегина Г.М.²

¹ORCID : 0000-0001-6851-1446;

²ORCID : 0000-0003-2091-8786;

^{1,2} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (kovregin[at]mail.ru)

Аннотация

Для типовых авиационных РЛС квазинепрерывного излучения с «встроенной» инерциально-спутниковой системой микронавигации фазового центра антенны предлагается метод автономных радиолокационных измерений наклонной дальности, радиальных составляющих скорости и ускорения фазового центра, обеспечивающих эффективную коррекцию инерциального канала микронавигации в условиях радиопомех, исключающих возможность использования корректирующих данных от спутниковых навигационных систем. Метод базируется на излучении/обработке сигналов от земли при «бинарных» пачках импульсов с линейной частотной модуляцией несущего колебания, возможностью управления крутизной модуляции и периодом повторения импульсов. Обеспечивается повышение информативности, потенциальной точности, помехоустойчивости сеанса измерений и возможность их реализации вне зависимости от текущих данных и точности инерциальной (микро)навигации/ориентации. Устраняются ограничения по ориентации главного луча РЛС, присущие известным методам измерения дальности/скорости с управлением углом наклона луча, расширяются возможности одновременного решения в РЛС основной функциональной задачи класса «воздух-воздух» и «фонового» выполнения предлагаемым методом радиолокационных измерений в интересах микронавигации РЛС. Представлены аналитические зависимости, результаты модельных и натурных экспериментов, подтверждающие работоспособность и эффективность применения предлагаемого метода.

Ключевые слова: авиационная РЛС, квазинепрерывное излучение, линейная частотная модуляция, бинарные частотно-временные измерения, микронавигация фазового центра антенны.

INFORMATION-AUTONOMOUS METHOD OF EXTENDED MICRO-NAVIGATION MEASUREMENTS IN QUASI-CONTINUOUS RADARS WITH ARBITRARY MAIN BEAM ORIENTATION

Research article

Kovregin V.N.^{1,*}, Kovregina G.M.²

¹ORCID : 0000-0001-6851-1446;

²ORCID : 0000-0003-2091-8786;

^{1,2} Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (kovregin[at]mail.ru)

Abstract

For typical aviation radars of quasi-continuous radiation with "built-in" inertial-satellite micromanagement system of the antenna phase centre, a method of autonomous radar measurements of inclined range, radial components of velocity and acceleration of the phase centre is proposed, providing effective correction of the inertial micromanagement channel in conditions of radio interference, excluding the possibility of using correction data from satellite navigation systems. The method is based on the emission/processing of signals from the ground at "binary" pulse packs with linear frequency modulation of the carrier oscillation, the possibility of controlling the steepness of modulation and pulse repetition period. Increase of informativeness, potential accuracy, noise immunity of measurement session and possibility of their implementation regardless of current data and accuracy of inertial (micro)navigation/orientation are provided. Restrictions on the orientation of the main radar beam inherent in the known methods of range/speed measurement with control of the beam inclination angle are eliminated, the possibilities of simultaneous solution of the main functional task of the "air-to-air" class in the radar and "background" performance of radar measurements in the interests of micro-navigation of the radar by the proposed method are expanded. Analytical dependencies, results of modelling and field experiments confirming the operability and efficiency of the proposed method are presented.

Keywords: aviation radar, quasi-continuous radiation, linear frequency modulation, binary frequency-time measurements, phase centre antenna micromanagement.

Введение

В современных авиационных радарх с синтезируемой апертурой антенны [1], [2] для отслеживания траектории ее фазового центра (ФЦА) используются специализированные инерциально-спутниковые микронавигационные системы (МНС), аппаратно-алгоритмически интегрированные в структуру РЛС [3], [4], [5]. Для РЛС X-диапазона и при

меньшей длине волны λ сохраняет актуальность *проблема* повышения точности МНС [2], [6], решение которой в настоящее время усложняется из-за усиления фактора организованных помех для аппаратуры глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), традиционно используемой в качестве высокоточного корректора для инерциальной подсистемы, являющейся функциональным «ядром» типовой МНС [3], [4], [5]. Становится уже типичной сигнально-шумовая/помеховая обстановка при применении МНС, практически исключающая возможность использования ГНСС-корректора и растет практическая значимость исследований в области «неспутниковой» микронавигации, в т. ч. связанных с применением нетрадиционных датчиков микронавигационной информации для эффективной коррекции инерциального канала МНС [3], [4], [5] при отсутствии данных от ГНСС. В работах [7], [8], [9] показаны возможности использования самой РЛС в качестве скоростного корректора собственной «встроенной» МНС и предложены:

- адаптивно-робастные (АР) методы измерения радиальной скорости/дальности ФЦА до земли при квазинепрерывном излучении (КНИ) РЛС;
- схемы и процедуры коррекции МНС на основе оценивания ошибок инерциального канала с использованием обобщенного фильтра Калмана (ОФК) [10] при комплексной обработке инерциальных и радиолокационных (РЛ) измерений.

Натурные эксперименты [7], [8], [9] с использованием такой РЛ скоростной коррекции показали, что в РЛ-инерциальном режиме при помехах ГНСС сохраняется работоспособность МНС, но, в сравнении с типовой позиционно-скоростной коррекцией от ГНСС [2], [3], [4], [5], обеспечивается относительно невысокая точность микронавигации ФЦА. При длительной работе МНС только в таком режиме [7], [8], [9] наблюдались случаи неконтролируемого роста ошибок оценивания – практической расходимости ОФК [11], прежде всего, обусловленной низкой информативностью, наличием «аномалий» (выбросов) первичных РЛ измерений, низкой частотой обновления РЛ информации, высокой динамикой и неопределенностью (параметрической и/или статистической) оцениваемого и измерительного процессов. Традиционные методы [7], [8], [9] предполагают контур АР управления ориентацией оси главного луча (ГЛ) диаграммы направленности антенны РЛС, опираясь на текущие измерения МНС и априорные данные об их точности. При этом для наиболее интенсивного эхосигнала от «следа» ГЛ на поверхности обеспечивается его «наблюдаемость» в рабочей зоне периода повторения импульсов (ППИ) и устранение причин неоднозначности измерений по дальности/углу наклона, которая при произвольной ориентации ГЛ может быть обусловлена суперпозицией сигналов от нескольких полос поверхности (ПП) в «следе» ГЛ, дистанцированных на кратное ППИ расстояние. Очевидно, что эффективность такого управления, точность и устойчивость процесса РЛ измерений существенно зависят от «качества» данных от МНС, используемых при управлении ГЛ перед каждым сеансом РЛ измерений. В условиях помех ГНСС типичной является длительная работа МНС в автономном (инерциальном) режиме, с существенным «накоплением» ее ошибок к моменту включения РЛС/назначения РЛ-инерциального режима микронавигации. В таких ситуациях «грубые» ошибки исходных данных для управления ГЛ, получаемых от МНС, не позволяют достичь целей этого управления (в аспектах наблюдаемости и эффекта суперпозиции сигналов), ведут к срывам сеанса РЛ измерений и «аномальным» оценкам траекторных параметров ФЦА, дальнейшее использование которых при скоростной коррекции МНС может быть критичным, практически нарушающим работоспособность МНС. Данные от МНС используются и при определении однозначной дальности [7], [8], [9] и их недостаточная точность также может приводить к аномальным (в несколько км) ошибкам в оценках дальности от ФЦА до земли и соответствующим ошибкам в расчетных углах наклона. В целом, существует объективная необходимость в разработке информационно-автономного метода РЛ микронавигационных измерений, эффективность применения которого не зависит от текущих данных МНС и уровня их точности. Кроме того, для повышения эффективности РЛ корректора в условиях интенсивного маневрирования носителя РЛС требуется расширение информативности РЛ измерений, как минимум, за счет измерения радиальной составляющей ускорения ФЦА. С другой стороны, традиционные методы [7], [8], [9] для сеанса РЛ измерений требуют специальной ориентации ГЛ, что затрудняет их реализацию одновременно с шагом решения основной функциональной задачи РЛС (например, поиск/обнаружение/сопровождение воздушного объекта на фоне земли), при которой ориентация ГЛ подчиняется другой логике, противоречащей требованиям по ориентации при РЛ измерениях. Как правило, при жестких требованиях к пропускной способности РЛС последовательная комбинация – с разнесением по времени шагов основной задачи и сеансов РЛ измерений для микронавигации – не представляется возможной. Возникает необходимость в разработке метода РЛ измерений, совмещаемого по времени с решением основной задачи РЛС, т. е. реализуемого в «фоновом» режиме при фактически произвольной ориентации ГЛ и параметрах излучения, диктуемых основной задачей РЛС. В данной работе в качестве основной рассматривается вышеуказанная задача класса «воздух-воздух», для решения которой используется режим КНИ с линейной частотной модуляцией несущего колебания (ЛЧМ) [7], [9], [12], [14], в общем случае, с варьируемой крутизной ЛЧМ и/или длительностью ППИ.

Цель данной статьи – представление информационно-автономного метода РЛ измерения дальности, радиальных составляющих скорости и ускорения ФЦА при квазинепрерывном ЛЧМ-излучении и любом направлении ГЛ радара, назначаемом управляющим алгоритмом РЛС при поиске/ обнаружении/ сопровождении маловысотной цели на фоне земли и в околоразностном «свободном» пространстве.

Прагматическая цель работы:

- расширение функциональных возможностей РЛС в режимах КНИ с ЛЧМ – в качестве автономного измерителя микронавигационных параметров ФЦА, функционирование которого совмещается (по параметрам КНИ и направлениям ГЛ) с типовыми режимами работы РЛС по маловысотным объектам;
- повышение информативности, помехоустойчивости и точности РЛ микронавигационных измерений в сравнении с типовыми методами;

• обеспечение работоспособности и приемлемой точности РЛ-инерциальной микронавигации ФЦА при организованных помехах ГНСС.

Основные результаты

В типовых АР методах [7], [8], [9] РЛ измерения дальности/радиальной скорости ФЦА при КНИ осуществляется по эхосигналам от одной пачки импульсов, излучаемых с высокой/высокой средней ЧПИ [1]. При этом, основываясь на текущих измерениях МНС, их априорно заданных точностных характеристиках, реализуется АР управление наклоном ГЛ, которое должно обеспечить выполнение следующих условий:

1) соответствие ПП, с которой пересекается ось ГЛ, дискрету неоднозначной задержки сигнала/дальности (НЗС) в «прозрачной» (рабочей) зоне ППИ;

2) исключение/снижение в рабочих дискретах НЗС в ППИ (вне зон бланкирования приемника), влияния эффекта суперпозиции сигналов от разных ПП в границах облучаемой ГЛ земной поверхности («следа» ГЛ), дистанцированных друг от друга на кратное ППИ расстояние.

По сути, выполняется «прицеливание» направления оси ГЛ в середину рабочей зоны ППИ и ограничение протяженности «следа» ГЛ с учетом данных МНС и известной угловой ширине ГЛ диаграммы направленности РЛС (ДН). Кроме того, данные МНС используются при адаптивном назначении границ режекции – для исключения из обработки принимаемых сигналов от «следов» боковых лепестков ДН (БЛ). Информативным является частотно-временное РЛ измерение, соответствующее глобальному максимуму амплитуды сигнала (ГМА), наблюдаемому в определенном дискрете НЗС в рабочей зоне ППИ. Типичные результаты натурального эксперимента, полученные при фактическом выполнении условий 1) и 2) в результате управления ГЛ, например, показаны на рис.1.

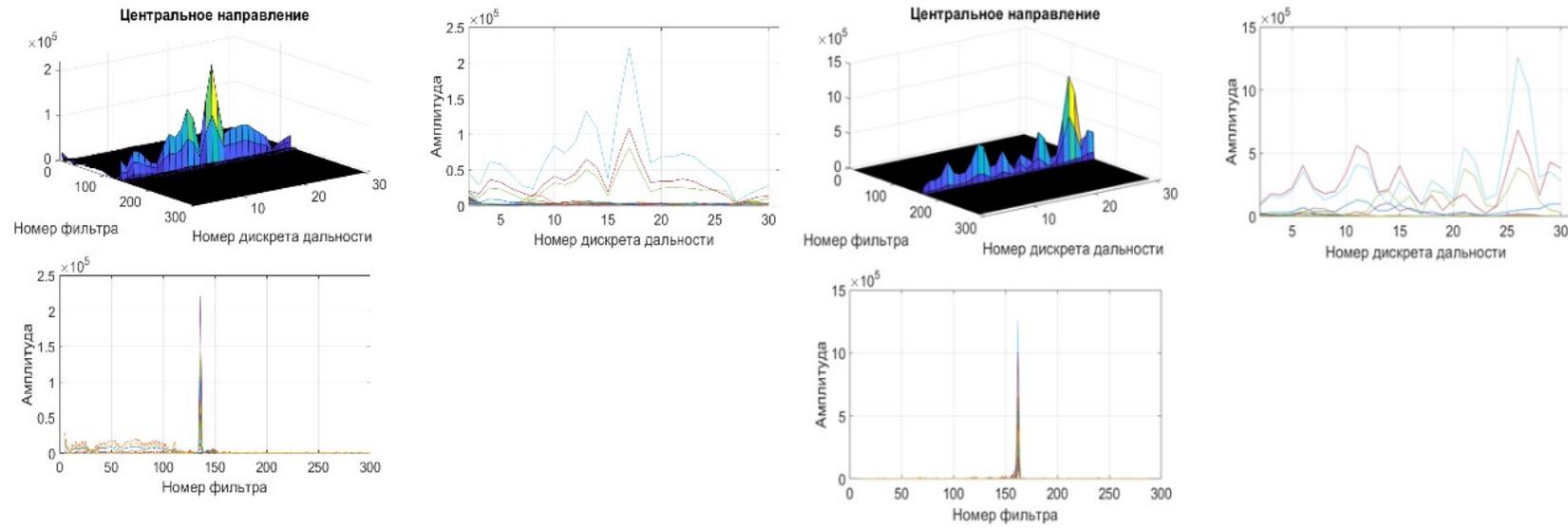


Рисунок 1 - Амплитуды сигнала от следа ГЛ в зависимости от дискрета НЗС (дальности) и номера доплеровского фильтра
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.57.1>

Очевидно, что возможность выполнения и точность таких измерений зависит от качества AP управления ГЛ, которое, в свою очередь, зависит от точности исходной информации от МНС. При больших погрешностях МНС, например, накапливаемых при длительной автономной работе МНС в инерциальном режиме перед сеансом РЛ измерения, возникают ситуации, когда:

- действительный ГМА соответствует «слепой» зоне ППИ (зоне бланкирования) и частотно-временные измерения по ГМА, наблюдаемые в «крайних» дискретах НЗС в ППИ характеризуются «аномальными» погрешностями;
- из-за неустраненной суперпозиции сигналов нескольких ПП (при реальной протяженности следа ГЛ, превышающей расчетную) отсутствует явно выраженный ГМА и измерения по ГМА в ППИ, в общем случае, произвольные, не связанные однозначно с дальностью/углом наклона.

Как характерный пример, на рис. 2 показаны результаты натурных экспериментов, полученные при фактическом нарушении условий 1) и 2) из-за грубых ошибок в данных от МНС, используемых при управлении ГЛ.

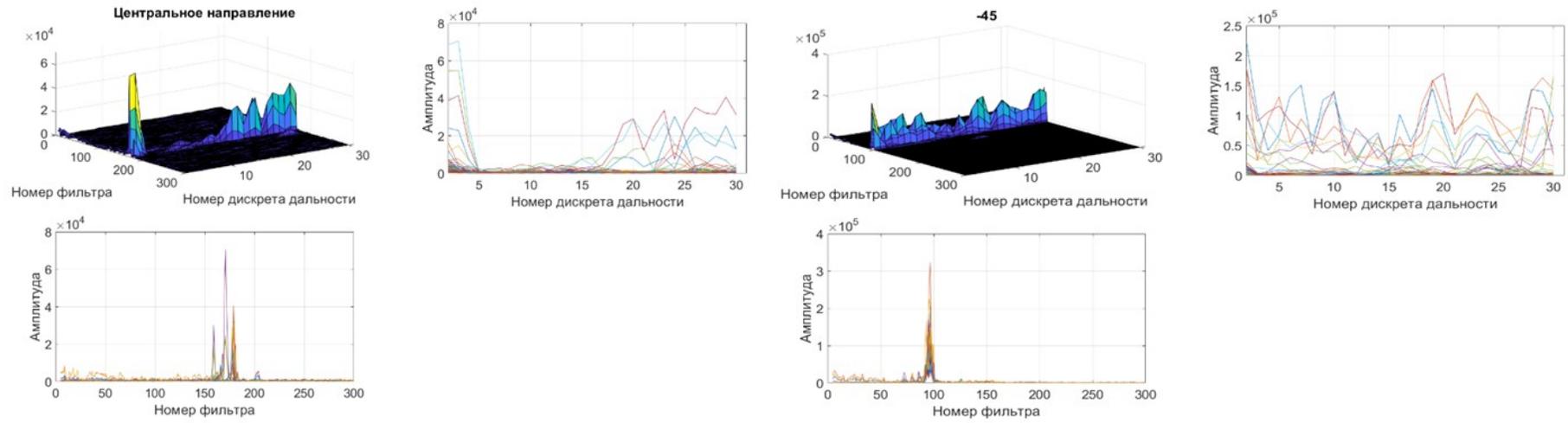


Рисунок 2 - Амплитуды сигналов от следа ГЛ, локальные и глобальные максимумы амплитуды при нарушении условий 1) и 2) вследствие аномальных ошибок в данных МНС, используемых при управлении ГЛ
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.57.2>

В любом случае, измерение доплеровской частоты (ДЧ) F_D , полученное в определенном дискрете с оценкой НЗС τ , является информативным только при его точной «привязке» к дальности R / направлению (углу наклона β) от ФЦА до конкретной ПП в следе ГЛ, дающей измерение ДЧ по ГМА:

$$R = \left(\frac{c}{2}\right) [r^* T_r + \tau] \quad (1)$$

$$\beta = \arcsin \left(\frac{H^*}{R}\right) \quad (2)$$

где

$$r^* = \text{int} \left(\frac{2H^*}{cT_r \sin \beta^*}\right) \quad (3)$$

– оценка индекса ППИ T_r на основании данных о геометрической высоте H^* ФЦА над рассматриваемой ПП в следе ГЛ и заданном угле наклона β^* при управлении ГЛ, полученных с использованием информации МНС; $\text{int}(\bullet)$ – целая часть числа в скобках; c – скорость радиоволны. В типовых методах [7], [8], [9] предполагается, что даже при относительно невысокой точности данных от МНС, как минимум, обеспечивается точное определение индекса ППИ вида (3) и, соответственно, однозначное определение дальности (1) на уровне погрешности $\delta\tau$ измерения НЗС и расчетного угла наклона (2) с точностью, которая в виде абсолютной ошибки $\delta\beta$ выражается через абсолютные ошибки $\delta R = (c/2) \delta\tau$ оценки дальности R и δH определения высоты H превышения ФЦА над геодезической высотой рассматриваемой ПП в «следе» ГЛ:

$$\delta\beta = \left[\sqrt{1 - \left[\frac{H}{R}\right]^2} \right]^{-1} \left[\frac{H\delta R + R\delta H}{R^2} \right] = \frac{\delta R \text{tg} \beta}{R} + \frac{\delta H}{R \cos \beta} = \frac{1}{R} [\delta R \text{tg} \beta + \delta H \sec \beta].$$

Однако, как показали натурные эксперименты при «нештатной» работе МНС и значительной параметрической и/или статистической неопределенности ее ошибок, однозначное определение индекса ППИ (3), дальности (1) и угла (2) во многих случаях практически не обеспечивается. Возникают аномальные оценки радиальной скорости, в основном обусловленные «грубыми» ошибками МНС по углу наклона. Дальнейшее использование таких аномальных оценок для коррекции МНС на основе ОФК очень быстро приводит к практической расходимости фильтрации и, следовательно, только к ухудшению работы МНС. Возникает задача – исключить возникновение аномальных РЛ измерений/оценок, вызванных недостоверными исходными данными МНС, используемыми при управлении ГЛ. Решение, по сути, сводится к разработке информационно автономного (ИА) метода РЛ микронавигационных измерений, слабо зависящего от исходной информации МНС и ее качества, когда даже «грубые» ошибки МНС не оказывают существенного влияния на точность РЛ измерений. Подход к решению, рассматриваемый в работе, основан на использовании ЛЧМ-излучения, при котором достигается «расщепление спектра» принимаемых сигналов от разных дистанцированных ПП в «следах» ГЛ и БЛ – рассредоточение по разным частотам, зависящим от дальностей до каждой конкретной ПП – и тем самым исключается суперпозиция сигналов, ведущая к неоднозначности по дальности/направлению. Предлагается метод РЛ микронавигационных измерений, базирующийся на излучении в заданном направлении ГЛ двух пачек импульсов P_{i-1} и P_i при КНИ с ЛЧМ, в общем случае, при варьировании крутизны ЛЧМ S и/или ППИ T_r , т. е. «бинарного пакета» $P_{i-1}(S_{i-1}; T_{r_{i-1}})/P_i(S_i; T_r)$, где $S_{i-1} \neq S_i$, $T_{r_{i-1}} \neq T_{r_i}$, а интервал $\Delta t_{\text{МП}}$ между началом текущей пачки t_i пачки и окончанием предыдущей $t_{i-1} + T_{P_{i-1}}$ минимизируется: $\Delta t_{\text{МП}} = t_i - (t_{i-1} + T_{P_{i-1}}) \rightarrow \min$, где $t_{P_{i-1}}$ – длительность пачки P_{i-1} в «бинарном пакете». Отметим, что именно такое излучение используется в АР методах наблюдения /сопровождения воздушных объектов [7], [9], [13], [18] и эти задачи далее рассматриваются как основные задачи РЛС, на фоне выполнения которых и в рамках указанного КНИ с ЛЧМ, одновременно реализуется и предлагаемый метод РЛ измерений.

При направленном вниз ГЛ и ЛЧМ излучении с крутизной S наблюдаемый в каждом дискрете НЗС в рабочей зоне ППИ, соответствующем оценке НЗС τ , спектр отраженных сигналов от участков земной поверхности, облучаемых ГЛ и БЛ диаграммы направленности, в общем случае, включает интенсивные составляющие на дальностно-доплеровских частотах (ДДЧ) $F_{RD(j)}$

$$F_{RD(j)} = \frac{2}{\lambda} V \cos \varphi_{(j)} + S [r_{(j)} T_r + \tau] = \left(\frac{2}{\lambda} W \cos \alpha \cos \beta_{(j)} - \frac{2}{\lambda} V_H \sin \beta_{(j)} \right) + S [r_{(j)} T_r + \tau] = F_{D(j)} + S [r_{(j)} T_r + \tau] \quad (4)$$

где V , W и V_H – траекторная, путевая и вертикальная скорости ФЦА, соответственно; $\varphi_{(j)}$ – угол между вектором траекторной скорости и направлением на j -ую ПП в границах «следов» ГЛ и БЛ, находящуюся на удалении (1) от ФЦА; α – азимутальный угол оси ГЛ относительно вектора путевой скорости; $\beta_{(j)}$ – угол наклона для направления к j -ой ПП. Соответственно (2) в спектре сигнала наблюдаются ГМА и локальные максимум амплитуды (ЛМА), каждый из которых однозначно соответствует определенной дальности до ПП, причем ПП удалены друг от друга на кратную ППИ дистанцию.

На рис. 3 показан типичный вид спектра отражений от земли при КНИ с ЛЧМ, полученный в натурном эксперименте при произвольном угле наклона ГЛ (с фактическими нарушениями вышеуказанных условий 1) и/или 2)).

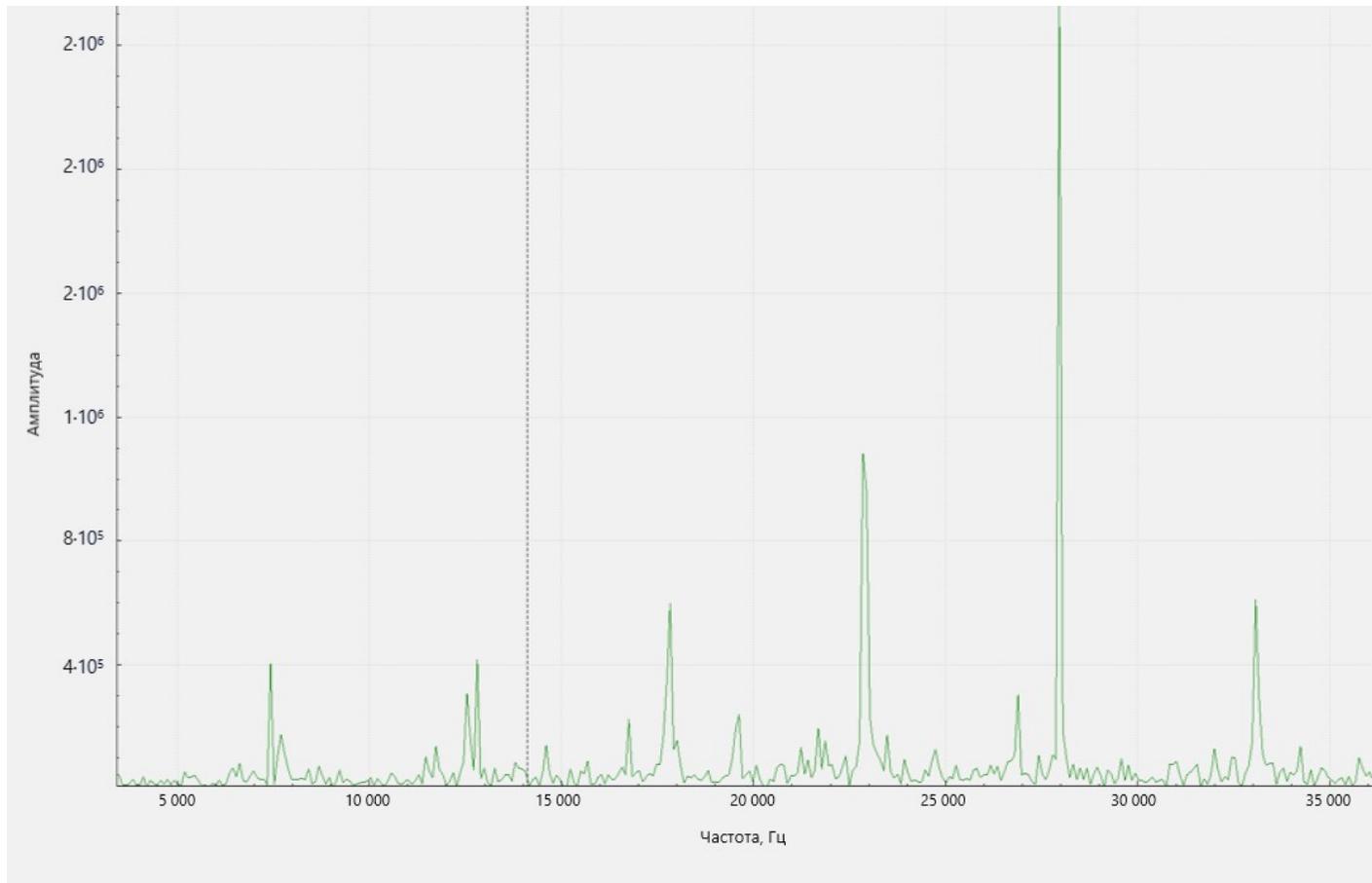


Рисунок 3 - Типичный спектр отраженного от земли ЛЧМ-сигнала в дискрете НЗС с ГМА, наблюдаемым в ППИ
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.57.3>

По первой пачке импульсов P_{i-1} при ППИ $T_{r_{i-1}}$ и крутизне ЛЧМ S_{i-1} как опорное частотно-временное измерение принимается:

- оценка НЗС τ_{i-1} , соответствующая тому дискрету НЗС в ППИ, в котором наблюдается ГМА;
- оценка ДДЧ вида (4) $F_{RD(r)i-1}$, соответствующая номеру фильтра с ГМА. Индекс ППИ $r=r_{i-1}$ при этом полагается неизвестным.

Для определения дальности вида (1) от ФЦА до ПП, формирующей ГМА, излучается вторая пачка P_i с КНИ при крутизне ЛЧМ $S_i \neq S_{i-1}$, по которой также определяются оценки НЗС τ_i по номеру дискрета с ГМА и соответствующей ДДЧ $F_{RD(r)i}$. В работе рассматривается малоскоростной носитель РЛС. При малом интервале между пачками $\Delta t_{МП}$ в бинарном пакете (P_{i-1}/P_i) фактически облучается одна и та же поверхность, ГМА формируется по сигналам от одной и той же ПП, т. е. ГМА не «дрейфует» по дискретам НЗС в ППИ и измерения/оценки НЗС $\tau_{i-1} = \tau_i = \tau$. Измерение/оценка ДДЧ вида (4) $F_{RD(r)i} \neq F_{RD(r)i-1}$, что обусловлено отличием назначаемой крутизны $S_i \neq S_{i-1}$ при одинаковой дальности до ПП, дающей ГМА. Аналогично известному способу измерения дальности и радиальной скорости для воздушной цели [12], по указанным бинарным частотно-временным измерениям земли может быть определена и дальность R_i от ФЦА до ПП, формирующей ГМА и радиальная скорость ФЦА V_{Ri} по направлению этой наклонной дальности. При $\tau_{i-1} = \tau_i = \tau$ для двух пачек, излучаемых при равных ППИ $T_{ri} = T_{r_{i-1}} = T_r$, обобщение известного метода [12] и для решения задачи определения дальности от ФЦА до ПП приводит к следующим приближенным выражениям (без учета движения ФЦА на интервале между моментами излучения пачек импульсов):

$$R_i^* \approx \frac{c}{2} \left(\frac{F_{RD(r)i} - F_{RD(r)i-1}}{S_i - S_{i-1}} \right) \quad (5)$$

$$r = \text{int} \left(\frac{2R_i^*}{cT_r} \right) \quad (6)$$

$$R_i = \frac{c}{2} (rT_r + \tau) \quad (7)$$

где $\text{int}(\cdot)$ – целая часть.

Угол наклона для этой дальности определяется выражением вида (2), в котором, например, при относительно ровной подстилающей поверхности используется геометрическая высота ФЦА, определяемая радиовысотометром. Радиальная скорость V_{Ri} ФЦА по направлению наклонной дальности (3)-(5), также по аналогии с известным способом [12], при заданной длине волны λ определяется приближенным соотношением:

$$V_{Ri} \approx \left(\frac{\lambda}{2} \right) \left(F_{RD(r)i} - \frac{S_i}{S_{i-1}} F_{RD(r)i-1} \right) \left(1 - \frac{S_i}{S_{i-1}} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Таким образом, при «бинарном» пакете из двух пачек импульсов с различной крутизной ЛЧМ, практически без использования данных инерциального канала МНС и независимо от уровня их ошибок, обеспечивается однозначное измерение наклонной дальности от ФЦА до определенной ПП с потенциальной точностью на уровне инструментальных ошибок измерения НЗС $\delta\tau$ / определения неоднозначной дальности $\delta R_{НЗС} = (c/2)\delta\tau$, а также радиальной скорости ФЦА по направлению этой наклонной дальности с потенциальной точностью на уровне инструментальной ошибки δF_{RD} измерения ДДЧ / определения скорости $(\lambda/2)\delta F_{RD}$. Очевидно, что автономность РЛ измерений на основе предлагаемого метода достигается «ценой» дополнительной пачки импульсов – в сравнении с традиционными «однопачечными» методами [7], [8], [9]. Но важно отметить, что при этом снимаются ограничения по углам наклона ГЛ, выдвигаемые при типовом АР управлении ГЛ [7], [8], [9], задаваемое направление ГЛ, в общем случае, может быть произвольным, включая и направленность ГЛ в окологоризонтное «свободное» воздушное пространство. В этом случае предложенный метод базируется на измерениях по ГМА, формируемых ПП в «следах» от БЛ и/или нижней части ГЛ и при этом нет необходимости в адаптивной режекции отражений по направлениям БЛ, реализуемой в типовых методах [7], [8], [9]. Практически отпадает необходимость управления ГЛ при микронавигационных измерениях, поскольку суперпозиция сигналов от разных ПП при ЛЧМ уже не является негативным фактором, вносящим неоднозначность измерений. Как следствие, расширяются возможности совмещенного (одновременного) решения задач РЛ измерений траекторных параметров ФЦА относительно земли (в интересах микронавигации РЛС) и обнаружения/сопровождения воздушного объекта на фоне мешающих отражения от земли при КНИ, используя при этом прозрачные диапазоны ДДЧ между локальными (ЛМА) амплитудными максимумами и ГМА (см. рис. 3), которые формируются отражениями от земли на ДДЧ, соответствующих соотношению (4). Основные подходы к такой комбинации задач показаны в работах [7], [8], [9] и в данной статье детально не рассматриваются. Отметим только, что вариации ППИ в рассматриваемом «бинарном» пакете ЛЧМ-пачек, осуществляемые при работе по воздушному объекту, не исключают возможность фоновой реализации предлагаемого метода РЛ измерений. Более того, при изменении ППИ, появляется возможность «дублирования» процедуры оценивания индекса ППИ для наклонных дальностей (например, на основе традиционной оценки целой части для отношения вида «изменение НЗС /приращение ППИ, вызвавшее это изменение НЗС» [7], [8], [9], но применительно к рассматриваемой ПП) для повышения достоверности оценки индекса ППИ.

Точность оценки дальности вида (5) по бинарному ЛЧМ-сигналу зависит от ширины дискрета частоты (ширины фильтра) $\Delta f = (1/n_{БПФ}T_r)$, где $n_{БПФ}$ – количество импульсов в пачке (база быстрого преобразования Фурье) и от назначаемой комбинации значений крутизны ЛЧМ. Исходя из присущих РЛС ограничений по физической реализации ЛЧМ, значения крутизны S_i и S_{i-1} назначаются таким образом, чтобы: с одной стороны, минимизировать ошибки определения дальности (5) и скорости (8); с другой стороны, в комбинации с назначаемым ППИ обеспечить «различимость» амплитудных максимумов (ГМА, ЛМА), формируемых в дискрете НЗС сигналами от двух

ближайших ПП, дистанцированных кратно ППИ. Например, если реализуема только положительная крутизна, то для минимизации ошибок при определении (5) и (8) целесообразны значения крутизны, при которых $|S_i - S_{i-1}| \rightarrow \max$ и $|S_i/S_{i-1}| \rightarrow \min$. Но при этом наименьшая крутизна при заданном ППИ должна обеспечивать достаточно широкий интервал $\Delta F_{RD(j/j-1)}$ между ближайшими амплитудными максимумами на соответствующих ДДЧ вида (4):

$$\begin{aligned} \Delta F_{RD(j/j-1)} &= F_{RD(j)} - F_{RD(j-1)} = \left(\frac{2}{\lambda} V \right) (\cos \varphi_{(j)} - \cos \varphi_{(j-1)}) + ST_r \\ &= F_{D(j)} - F_{D(j-1)} + ST_r = \Delta F_{D(j/j-1)} + ST_r, \end{aligned} \quad (9)$$

значительно превышающий суммарную ширину доплеровских спектров сигналов от двух рассматриваемых ПП, т. е. при положительных значениях крутизны ЛЧМ существует дополнительное ограничение «снизу» (кроме аппаратных ограничений), диктуемое критерием «различимости» амплитудных максимумов по ДДЧ. При использовании ЛЧМ с положительной и отрицательной крутизной, важно учитывать особенности поведения ДДЧ (4) при $S < 0$, например, детально рассматриваемые в работе [19]. На рис. 4 показан характерный вид зависимости ДДЧ (в Гц) от модуля отрицательной крутизны ЛЧМ и угла наклона (2) для направлений к рассматриваемой ПП (при фиксированной высоте H и скорости V ФЦА). Из рис. 4 видно, что в области угла наклона, соответствующего экстремуму функции ДДЧ (из решения кубического уравнения [19]), разнесение спектров сигналов от разноудаленных ПП может быть небольшим и при типовой ширине фильтра (десятки Гц) «различимость» амплитудных максимумов может не обеспечиваться.

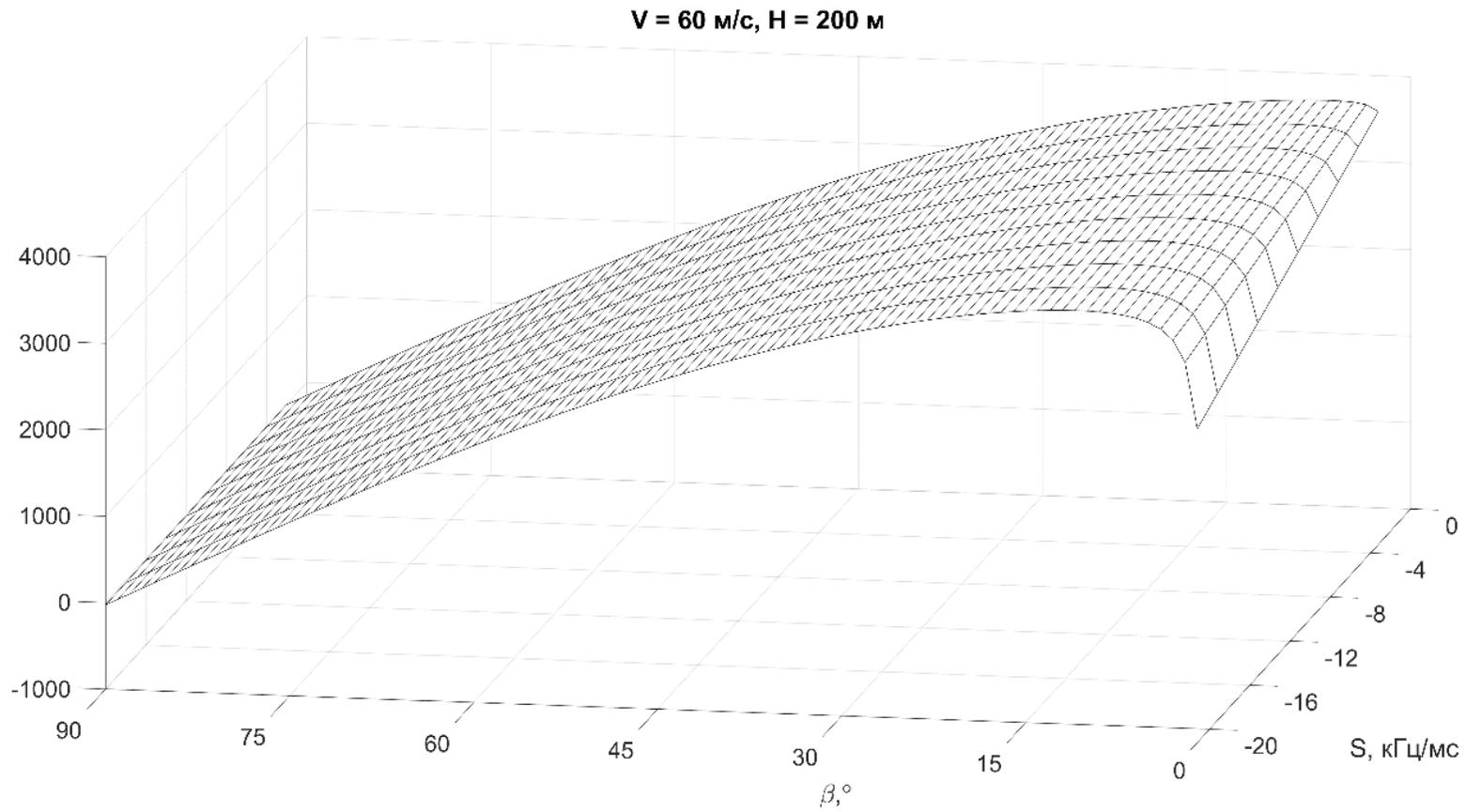


Рисунок 4 - Зависимость ДДЧ от угла наклона β к ПП и отрицательной крутизны ЛЧМ S
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.57.4>

Натурные эксперименты показали, что точное определение индекса ППИ (в соответствии с (5), (6) при типовых параметрах КНИ с ЛЧМ и вышеуказанных ограничениях «по различимости») обеспечивается и итоговая точность определения дальности (7) соизмерима с точностью инструментальных измерений НЗС/неоднозначной дальности, обычно составляющей $\approx 15...25$ м (при коротких импульсах, скользящем суммировании при внутривысокочастотной обработке сигнала). Точность по скорости соответствует уровню точности измерений при $\Delta f = (1/n_{\text{БПФ}} T_r)$. Например, для ситуации с инвертируемым знаком крутизны $S_i = -S_{i-1} > 0$ экспериментальные ошибки по радиальной скорости согласуются с расчетной величиной абсолютной ошибки по скорости $\delta V_R = (\lambda/2) \Delta f$, выражаемой путем варьирования соотношения (8) и составляющей $\approx 0, 1...0,2$ м/с при длине волны λ около 0,03 м.

В условиях интенсивного маневрирования носителя РЛС возникает необходимость повышения информативности РЛ микронавигационных измерений при бинарных пачках импульсов при КНИ с ЛЧМ, прежде всего, обеспечивая измерение радиального ускорения ФЦА a_R относительно земной поверхности (по направлению наклонной дальности до ПП в следе ГЛ или БЛ, дающей ГМА. Известны способы [13], [14] определения радиального ускорения воздушной цели относительно РЛС, реализуемые при КНИ с ЛЧМ. Можно показать, что их применение обобщается и для задачи определения радиального ускорения ФЦА a_R относительно указанной ПП, но при этом требуется три пачки импульсов с различной крутизной ЛЧМ, что не позволяет использовать эти способы при рассматриваемых бинарных ЛЧМ-пачках и, следовательно, затрудняет совмещение сеанса РЛ микронавигационных измерений с «двухпачечным» шагом при решении РЛС вышеуказанных основных задач класса «воздух-воздух». Для обеспечения такой совместимости разработан нетрадиционный метод измерения a_R при бинарных ЛЧМ-пачках, суть которого состоит в следующем.

Рассмотрим выражение для ДДЧ, полученных по ЛЧМ-пачкам, излученным в $(i-1)$ -ый и i -й моменты времени с интервалом между моментами излучения Δt . Предполагается, что присутствует ускорение a_R , которой приводит в дополнительной ЛЧМ с крутизной S_a . Тогда

$$F_{RD_{i-1}} = F_{D_{i-1}} + (S_{i-1} + S_a) \frac{\lambda}{c} R_{i-1} ;$$

$$F_{RD_i} = F_{D_i} + (S_i + S_a) \frac{\lambda}{c} R_i = F_{D_i} + (S_i + S_a) \frac{\lambda}{c} (R_{i-1} - \Delta R_{i|j-1}) .$$

Учтем, что

$$a_R = \frac{\lambda}{2} S_a \tag{10}$$

$$\Delta R_{i|j-1} = V_{R_{i-1}} \Delta t + a_R \frac{\Delta t^2}{2} = V_{R_{i-1}} \Delta t + \frac{\lambda}{2} S_a \frac{\Delta t^2}{2} , \quad F_{D_i} = F_{D_{i-1}} + S_a \Delta t .$$

Рассмотрим выражение для разности ДДЧ

$$\Delta F_{RD_{i/i-1}} = F_{RD_i} - F_{RD_{i-1}} = S_a \left(\Delta t - S_i \frac{\lambda}{c} \frac{\Delta t^2}{2} - \frac{\lambda}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t \right) - S_a \frac{\lambda}{c} \frac{\Delta t^2}{2} + (S_i - S_{i-1}) \frac{\lambda}{c} R_{i-1} - S_i \frac{\lambda}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t$$

из которого получаются соотношения

$$S_a^2 \frac{\lambda}{c} \frac{\Delta t^2}{2} - S_a \left(\Delta t - S_i \frac{\lambda}{c} \frac{\Delta t^2}{2} - \frac{\lambda}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t \right) - (S_i - S_{i-1}) \frac{\lambda}{c} R_{i-1} + S_i \frac{\lambda}{c} V_{R_{i-1}} \Delta t + \Delta F_{RD_{i/i-1}} = 0 ;$$

$$S_a^2 \frac{1}{f_0} \left(\frac{\Delta t^2}{2} + \frac{c}{2} T_{\text{osci-1}} \Delta t \right) - S_a \left[\left(\Delta t - S_i \frac{1}{f_0} \frac{\Delta t^2}{2} - \frac{1}{f_0} (F_{RD_{i-1}} - S_{i-1} T_{\text{osci-1}}) \Delta t \right) - S_i \frac{1}{f_0} T_{\text{osci-1}} \Delta t \right] -$$

$$- (S_i - S_{i-1}) T_{\text{osci-1}} + S_i \frac{1}{f_0} (F_{RD_{i-1}} - S_{i-1} T_{\text{osci-1}}) \Delta t + \Delta F_{RD_{i/i-1}} = 0 , \tag{11}$$

где f_0 – несущая частота, $T_{\text{osc}} = r T_r + \tau$ – однозначная задержка сигнала от ПП, формирующей ГМА. Представим (11) в виде квадратного уравнения:

$$A_S S_a^2 + B_S S_a + C_S = 0 \tag{12}$$

где $A_S = \frac{1}{f_0} \left(\frac{\Delta t^2}{2} + \frac{c}{2} T_{\text{osci-1}} \Delta t \right)$; $B_S = \Delta t \left(1 - \frac{1}{f_0} \left[S_i \frac{\Delta t}{2} - F_{RD_{i-1}} - (S_i - S_{i-1}) T_{\text{osci-1}} \right] \right)$;

$$C_S = - (S_i - S_{i-1}) T_{\text{osci-1}} + S_i \frac{1}{f_0} (F_{RD_{i-1}} - S_{i-1} T_{\text{osci-1}}) \Delta t + \Delta F_{RD_{i/i-1}} .$$

Отметим, что величины $F_{RD_{i-1}}$, $\Delta F_{RD_{i/i-1}}$, $T_{\text{osci-1}}$ измеряются, значения крутизны ЛЧМ, несущей частоты и интервала между моментами излучением ЛЧМ-пачек известны. Следовательно, значение крутизны S_a , обусловленной радиальным ускорением можно найти из решения квадратного уравнения (12) и далее по выражению (10) определяется радиальное ускорение ФЦА по направлению измеряемой наклонной дальности. Предложенный «квадратичный метод» определения радиального ускорения ФЦА при имитационном моделировании сложной траектории ФЦА типа «змейка» при интервале $\Delta t = 0,25$ с за время полета 350 с обеспечил среднее значение для ошибок оценивания ускорения $\approx 0,002$ м/с² при среднеквадратическом отклонении ≈ 1 м/с².

Заклучение

Таким образом, при типичном режиме КНИ бинарных ЛЧМ-пачек при вариациях крутизны ЛЧМ и ППИ, используемом на каждом цикле при решении известными адаптивно-робастными методами задач обнаружения, захвата, сопровождения воздушных целей на фоне земли и околоразностного свободного пространства, основываясь на частотно-временных измерениях отражений от земли (традиционно рассматриваемых как «мешающие»), предложен информационно-автономный метод РЛ измерений микронавигационных параметров ФЦА радара, выполняемых одновременно с шагом решения в РЛС указанных основных задачи класса «воздух-воздух», обеспечивающий определение дальности, радиальных составляющих скорости и ускорения ФЦА по направлению к определенной ПП на облучаемой поверхности, формирующей наиболее интенсивный сигнал в спектре мешающих отражений, наблюдаемый в виде ГМА в ППИ. Метод не требует управления и специальной ориентации направления оси ГЛ для

сеанса измерений, является независимым от информации МНС радара и, в сравнении с типичными методами РЛ измерений при КНИ, характеризуется повышенной информативностью, помехоустойчивостью и потенциальной точностью микронавигационных измерений, что обеспечивает возможность их эффективного использования в качестве данных корректирующего канала (датчика) в режиме РЛ-инерциальной микронавигации ФЦА, работоспособного и обеспечивающего приемлемую точность МНС при сложной радиопомеховой обстановке, исключающей возможность традиционного использования данных ГНСС.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Шкиндеров М.С., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.57.5>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Shkinderov M.S., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.57.5>

Список литературы / References

1. Справочник по радиолокации / Под ред. М.И. Сколника; пер. с англ. под общ. ред. В.С. Вербы. — Москва: Техносфера, 2015. — Кн. 1. — 672 с.
2. Авиационные системы радиовидения / Под ред. Г.С. Кондратенкова. — М.: Радиотехника, 2015. — 648 с.
3. Chernodarov A.V. Using an inertial satellite navigation system for determination of motion parameters of the radar antenna phase center / A.V. Chernodarov, A.P. Patrikeev, V.N. Kovregin [et al.]. — Saint-Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2016. — P. 315–323.
4. Чернодаров А.В. Летная отработка распределенной системы инерциально-спутниковой микронавигации для радиолокатора с синтезированной апертурой / А.В. Чернодаров, А.П. Патрикеев, В.Н. Коврегин [и др.] // Научный Вестник МГТУ ГА. — 2017. — № 20 (1). — С. 222–231.
5. 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 «XXX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам». — Санкт-Петербург: Электроприбор, 2023. — С. 38–40.
6. Красильщиков М.М. К проблеме высокоточного позиционирования фазового центра антенны многофункциональной РЛС авиационного базирования / М.М. Красильщиков, Д.А. Козорез, К.И. Сыпало [и др.] // Гироскопия и навигация. — 2013. — № 2 (81). — С. 14–30.
7. Коврегин В.Н. Метод комбинированных микронавигационных измерений в радаре квазинепрерывного излучения при обзоре воздушного пространства на фоне земли / В.Н. Коврегин, Г.М. Коврегина // Сборник материалов «XXXI Санкт-Петербургской международной конференция по интегрированным навигационным системам». — Санкт-Петербург: Электроприбор, 2024. — С. 188–191.
8. Коврегин В.Н. Методы и алгоритмы активного адаптивно-робастного сопровождения аэрообъекта и сопутствующих микронавигационных измерений в радарх квазинепрерывного излучения / В.Н. Коврегин, Г.М. Коврегина // Сборник материалов «XXXI Санкт-Петербургской международной конференция по интегрированным навигационным системам». — Санкт-Петербург: Электроприбор, 2024. — С. 192–195.
9. Коврегин В.Н. Адаптивно-робастные методы сопутствующих микронавигационных измерений по мешающим отражениям при поиске/наблюдении/сопровождении низколетящей цели / В.Н. Коврегин, Г.М. Коврегина, А.С. Мурзаев // Радиотехника. — 2024. — Т. 88. — № 8. — С. 91–103
10. Брюмера К. Фильтр Калмана-Бьюси / К. Брюмера, Г. Зифлинг; пер. с нем. под ред. И.Е. Казакова. — М.: Наука, 1982. — 200 с.
11. Шли Ф.Х. Расходимость фильтрации по методу Калмана / Ф.Х. Шли, С.И. Стендиш, Н.Ф. Тода // Ракетная техника и космонавтика. — 1967. — Т. 5. — № 6. — С. 73–81.
12. Пат. 28013193 Российская Федерация. Способ обнаружения, измерения дальности и скорости низколетящей малоскоростной цели в импульсно-доплеровских РЛС при высокой частоте повторения импульсов и инвертируемой ЛЧМ / Коврегин В.Н., Коврегина Г.М.; патентообладатель — Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.
13. Пат. 26929121 Российская Федерация. Способ одновременного измерения дальности, скорости и ускорения малоскоростной маневрирующей воздушной цели в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях при высокой частоте повторения импульсов и линейной частотной модуляции / Коврегин В.Н., Коврегина Г.М.; патентообладатель — Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации.
14. Пат. 2801393 Российская Федерация. Способ обнаружения, измерения дальностей, скоростей и ускорений нескольких малоскоростных низковысотных целей в главном луче импульсно-доплеровских радиолокаторов / Коврегин В.Н., Коврегина Г.М.; патентообладатель Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.
15. Kovregin V. Adaptive-robust methods for detecting, capturing and tracking hovering, low- and high-speed objects in integrated radar-inertial systems with quasi-continuous radiation / V. Kovregin, G. Kovregina. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9470845> (accessed: 17.10.2021).

16. Kovregin V.N. A Unified Method for Observation of an Air Object with a Complex Spectrum in Radar with Quasi-Continuous Radiation / V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, A.S. Murzaev // 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor. JSC. — 2022. — P. 56–59.

17. Коврегин В.Н. Адаптивно-робастное всеракурсное наблюдение разнотипных объектов в главном луче радара с квазинепрерывным ЛЧМ-излучением / В.Н. Коврегин, Г.М. Коврегина, А.С. Мурзаев [и др.] // Радиотехника. — 2023. — Т. 87. — № 1. — С. 69–78. — DOI: 10.18127/j00338486-202301-00.

18. Коврегин В.Н. Оценивание и управление параметрами спектра мешающих отражений в радарах с квазинепрерывным ЛЧМ-излучением при адаптивно-робастном наблюдении/сопровождении объекта / В.Н. Коврегин, Г.М. Коврегина / Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — № 7 (145). — URL: <https://research-journal.org/archive/7-145-2024-july/10.60797/IRJ.2024.145.45> (дата обращения: 17.07.2024). — DOI: 10.60797/IRJ.2024.145.45.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Spravochnik po radiolokacii [Radar Handbook] / Ed. by M.I. Skolnik; transl. from Eng. and gen. ed. by V.S. Verba. — Moscow: Tehnosfera, 2015. — Book 1. — 672 p. [in Russian]

2. Aviacionnye sistemy radiovideniya [Aircraft radio vision systems] / Ed. by G.S. Kondratenkov. — M.: Radiotekhnika, 2015. — 648 p. [in Russian]

3. Chernodarov A.V. Using an inertial satellite navigation system for determination of motion parameters of the radar antenna phase center / A.V. Chernodarov, A.P. Patrikeev, V.N. Kovregin [et al.]. — Saint-Petersburg: Concern CSRI Elektropribor, 2016. — P. 315–323.

4. Chernodarov A.V. Letnaja otrabotka raspredelennoj sistemy inercial'no-sputnikovoj mikronavigacii dlja radiolokatora s sintezirovannoj aperturoj [Flight testing of the distributed inertial-satellite micronavigation system for the synthetic aperture radar] / A.V. Chernodarov, A.P. Patrikeev, V.N. Kovregin [et al.] // Nauchnyj Vestnik MGTU GA [Scientific Bulletin of MSTU GA]. — 2017. — № 20 (1). — P. 222–231. [in Russian]

5. Chernodarov A.V. Inercial'no-sputnikovaja sistema mikronavigacii dlja radiolokatora s sintezirovannoj aperturoj i doplerovskim kanalom izmereniya traektornoj skorosti [Inertial-satellite micronavigation system for radar with synthetic aperture and Doppler channel of trajectory velocity measurement] / A.V. Chernodarov, V.N. Kovregin, G.M. Kovregina // Sbornik materialov «XXX Sankt-Peterburgskaja mezhdunarodnaja konferencija po integrirovannym navigacionnym sistemam» [Proceedings of the XXX Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems]. — St.Petersburg: Jelektropribor, 2023. — P. 38–40. [in Russian]

6. Krasil'shhikov M.M. K probleme vysokotochnogo pozicionirovanija fazovogo centra anteny mnogofunkcional'noj RLS aviacionnogo bazirovanija [To the problem of high-precision positioning of the antenna phase centre of a multifunctional aviation-based radar] / M.M. Krasil'shhikov, D.A. Kozorez, K.I. Sypalo [et al.] // Girokopija i navigacija [Gyroscopy and Navigation]. — 2013. — № 2 (81). — P. 14–30. [in Russian]

7. Kovregin V.N. Metod kombinirovannyh mikronavigacionnyh izmerenij v radare kvazinepreryvnogo izluchenija pri obzore vozdušnogo prostranstva na fone zemli [Method of combined micronavigation measurements in the radar of quasi-continuous radiation in the airspace survey on the ground background] / V.N. Kovregin, G.M. Kovregina // Sbornik materialov «XXXI Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj konferencija po integrirovannym navigacionnym sistemam» [Proceedings of the 'XXXI Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems']. — St.Petersburg: Jelektropribor, 2024. — P. 188–191. [in Russian]

8. Kovregin V.N. Metody i algoritmy aktivnogo adaptivno-robastnogo soprovozhdenija ajeroob'ekta i soputstvujushhih mikronavigacionnyh izmerenij v radarah kvazinepreryvnogo izluchenija [Methods and algorithms of active adaptive-robust tracking of an aerobject and accompanying micronavigation measurements in quasi-continuous radars] / V.N. Kovregin, G.M. Kovregina // Sbornik materialov «XXXI Sankt-Peterburgskoj mezhdunarodnoj konferencija po integrirovannym navigacionnym sistemam» [Proceedings of the XXXI Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems]. — St.Petersburg: Jelektropribor, 2024. — P. 192–195. [in Russian]

9. Kovregin V.N. Adaptivno-robastnye metody soputstvujushhih mikronavigacionnyh izmerenij po meshajushhim otrazhenijam pri poiske/nabljudenii/soprovozhdenii nizkoletjashhej celi [Adaptive-robust methods of accompanying micronavigation measurements by interfering reflections during search/surveillance/tracking of a low-flying target] / V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, A.S. Murzaev // Radiotekhnika [Radio Engineering]. — 2024. — Vol. 88. — № 8. — P. 91–103 [in Russian]

10. Brjumer K. Fil'tr Kalmana-B'jusi [Kalman-Bucy filter] / K. Brjumer, G. Zifling; transl. from Ger. and ed. by I.E. Kazakov. — M.: Nauka, 1982. — 200 p. [in Russian]

11. Shli F.H. Rashodimost' fil'tracii po metodu Kalmana [Calman filtering convergence] / F.H. Shli, S.I. Stendish, N.F. Toda // Raketnaja tehnika i kosmonavtika [Rocket Technology and Cosmonautics]. — 1967. — Vol. 5. — № 6. — P. 73–81. [in Russian]

12. Pat. 28013193 Rossijskaja Federacija. Sposob obnaruzhenija, izmereniya dal'nosti i skorosti nizkoletjashhej maloskorostnoj celi v impul'sno-doplerovskih RLS pri vysokoj chastote povtoreniya impul'sov i invertiruemoj LChM [Pat. 28013193 Russian Federation. Method of detection, range and velocity measurement of a low-flying low-speed target in pulse-Doppler radars at high pulse repetition rate and inverted LFM] / Kovregin V.N., Kovregina G.M.; patentee – the Russian Federation, on behalf of which the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation is acting. [in Russian]

13. Pat. 26929121 Rossijskaja Federacija. Sposob odnovremennogo izmereniya dal'nosti, skorosti i uskoreniya maloskorostnoj manevrirujushhej vozdušnoj celi v impul'sno-doplerovskih radiolokacionnyh stancijah pri vysokoj chastote povtoreniya impul'sov i linejnoy chastotnoj moduljacii [Pat. 26929121 Russian Federation. Method of simultaneous measurement of range, velocity and acceleration of a low-speed manoeuvring air target in pulse-Doppler radar stations at high

pulse repetition rate and linear frequency modulation] / Kovregin V.N., Kovregina G.M.; patentee – Russian Federation, on behalf of which the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation is acting. [in Russian]

14. Pat. 2801393 Rossijskaja Federacija. Sposob obnaruzhenija, izmerenija dal'nostej, skorostej i uskorenij neskol'kih maloskorostnyh nizkovysotnyh celej v glavnom luche impul'sno-doplerovskih radiolokatorov [Pat. 2801393 Russian Federation. Method of detection, measurement of ranges, velocities and accelerations of several low-velocity low-altitude targets in the main beam of pulse-Doppler radars] / Kovregin V.N., Kovregina G.M.; patentee Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrument Engineering. [in Russian]

15. Kovregin V. Adaptive-robust methods for detecting, capturing and tracking hovering, low- and high-speed objects in integrated radar-inertial systems with quasi-continuous radiation / V. Kovregin, G. Kovregina. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9470845> (accessed: 17.10.2021).

16. Kovregin V.N. A Unified Method for Observation of an Air Object with a Complex Spectrum in Radar with Quasi-Continuous Radiation / V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, A.S. Murzaev // 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor. JSC. — 2022. — P. 56–59.

17. Kovregin V.N. Adaptivno-robustnoe vserakursnoe nabljudenie raznotipnyh ob'ektov v glavnom luche radara s kvazinepreryvnym LChM-izlucheniem [Adaptive-robust all-around observation of different-type objects in the main beam of a radar with quasi-continuous LFM radiation] / V.N. Kovregin, G.M. Kovregina, A.S. Murzaev [et al.] // Radiotekhnika [Radionetics]. — 2023. — Vol. 87. — № 1. — P. 69–78. — DOI: 10.18127/j00338486-202301-00. [in Russian]

18. Kovregin V.N. Ocenivanie i upravlenie parametrami spektra meshajushhix otrazhenij v radarah s kvazinepreryvnym LChM-izlucheniem pri adaptivno-robustnom nabljudenii/soprovozhdenii ob'ekta [Estimation and control of interfering reflective spectrum parameters in radars with quasi-continuous LFM radiation for adaptive robust observation/tracking of an object] / V.N. Kovregin, G.M. Kovregina / Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2024. — № 7 (145). — URL: <https://research-journal.org/archive/7-145-2024-july/10.60797/IRJ.2024.145.45> (accessed: 17.07.2024). — DOI: 10.60797/IRJ.2024.145.45. [in Russian]