



УНИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД АДАПТИВНО-РОБАСТНОЙ РЕДУКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ПРИ РАСКРЫТИИ «СЛЕПЫХ» ЗОН И ДАЛЬНОМЕТРИИ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИМПУЛЬСНО-ДОПЛЕРОВСКИХ РАДАРАХ

В. Н. Коврегин, Г.М. Коврегина

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Предложен и исследован единый метод раскрытия слепых дальностей, снижения или устранения неоднозначности измерения, позволяющий в рамках типового сеанса дальнего обнаружения воздушного объекта импульсно-доплеровским радаром сократить временные затраты, расширить информативность, унифицировать технологию алгоритмического обеспечения сеанса обнаружения. В основе: унифицированные адаптивно-робастные процедуры управления излучением (гарантирующие наблюдаемость объекта) и обработки неоднозначных квазиизмерений дальности (при отсутствии обнаружения) и реального измерения (при первоначальном обнаружении).

Ключевые слова: импульсно-доплеровский радар; высокая частота повторения импульсов; слепые дальности; адаптация параметров излучения; квазиизмерение, минимизация времени, оценка дальности

Для цитирования:

Коврегин В. Н., Коврегина Г. М. Унифицированный метод адаптивно-робастной редукции неопределенностей при раскрытии «слепых» зон и дальнометрии воздушных объектов в импульсно-доплеровских радарх // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №4(30), ISSN 2007-5687. – СПб.: ГУАП., 2021 – с. 42–48. РИНЦ. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-42-48.

UNIFIED METHOD OF ADAPTIVE-ROBUST REDUCTION OF UNCERTAINTIES IN THE ELIMINATION OF BLIND SPOTS AND RANGING OF AIR OBJECTS IN PULSE-DOPPLER RADARS

V. N. Kovregin, G. M. Kovregina

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

A unified method of disclosing blind ranges, reducing or eliminating measurement ambiguity has been proposed and investigated, which allows, within the framework of a typical long-range detection session of an air object by a pulse-Doppler radar, to reduce time costs, expand information content, and unify algorithmic support of a detection session. At the heart of: unified adaptive-robust procedures for controlling radiation parameters (guaranteeing the observability of an object) and processing ambiguous quasi-measurements of range (in absence of detection) and real measurement (in initial detection).

Key words: pulse-Doppler radar; high pulse repetition rate; blind range; adaptation of radiation parameters; quasi-measurement, time minimization, range estimation

For citation:

Kovregin V. N., Kovregina G. M. Unified method of adaptive-robust reduction of uncertainties in the elimination of blind spots and ranging of air objects in pulse-doppler radars // System analysis and logistics.: №4(30), ISSN2007-5687. – Russia, Saint-Petersburg.: SUAI., 2021 – p.42-48. DOI: 10.31799/2077-5687-2021-4-42-48.

Введение

В настоящее время широкий класс задач обзора воздушного пространства в интересах управления воздушным движением, повышения безопасности полетов, предотвращения несанкционированного проникновения и других приложений решается с использованием импульсно-доплеровских РЛС. В таких радарх с большой дальностью обнаружения в режиме высокой частоты повторения импульсов (ВЧПИ) F_r типичная циклограмма работы в заданном направлении излучения включает этапы [1]: обнаружения; измерения траекторных параметров (захвата); сопровождения воздушного объекта (ВО). В сеансе обнаружения традиционно решаются задачи: раскрытия слепых дальностей [1,2]; измерения радиолокационных параметров обнаруженного объекта, а именно: доплеровской частоты F_D , однозначно связанной со скоростью сближения $V_R=0.5\lambda F_D$, где λ – длина волны; задержки



эхо-сигнала объекта τ_{ASD} относительно начала излучения в периоде повторения импульсов (ППИ) $T_r = 1/F_r$, неоднозначно связанной с дальностью $R_{r(j)} = 0.5c [r_{(j)} T_r + \tau_{ASD}]$, где $r_{(j)} = 0, 1, \dots$ – априорно неизвестный индекс ППИ, c – скорость распространения радиоволны. Раскрытие слепых дальностей традиционно осуществляется при излучении серии из N_{Tr} пачек импульсов с разными значениями ППИ, где N_{Tr} и $T_{r(k)}$ ($k = 2, \dots, N_{Tr}$) рассчитываются априорно с учетом максимальной дальности обнаружения и ширины слепой зоны в ППИ. В широком диапазоне дальностей обнаружения, например, [300 м; 100 км] требуется $N_{Tr} \geq 5$ [1], а на следующем этапе – при захвате по дальности на основе традиционного перебора ППИ [1, 2] – требуется не менее (8...10) пачек импульсов. В ряде практических приложений режима ВЧПИ с длительным когерентным накоплением сигнала суммарные временные затраты на обнаружение/захват являются неприемлемыми. В целом для этих этапов актуальна проблема достижения требуемого уровня оперативности. Одним из направлений минимизации времени захвата является применение адаптивно-робастных процедур управления ППИ при обработки неоднозначных измерений [3,4], которые предполагают пошаговое сужение диапазона возможных дальностей объекта на момент обнаружения объекта $[R_{min(0)}; R_{max(0)}]$ до редуцированного интервала $[R_{min(i)}; R_{max(i)}]$ с индексным диапазоном $[r_{min(i)}; r_{max(i)}]$. Этот диапазон формируется по оценкам отношения наблюдаемого смещения задержки сигнала $\Delta\tau_{ASD(i/i-1)} = \tau_{ASD(i)} - \tau_{ASD(i-1)}$ к допустимому максимуму приращения ППИ $\Delta T_{r(i/i-1)}$, вызвавшего это смещение. В результате нескольких итераций этот диапазон вырождается, т. е. сходится к значениям $r_{min(j)} = r_{(j)} = r_{max(j)}$, причем темп сходимости существенно зависит от ширины исходного диапазона $[R_{min(0)}; R_{max(0)}]$. После типового сеанса обнаружения неопределенность объекта по дальности сохраняется в диапазоне от сотен м до максимальной дальности обнаружения (≥ 100 км).

Прагматическая цель данной работы одновременно состоит: в минимизации затрат времени (количества пачек) на сеанс обнаружения с раскрытием слепых зон в широком диапазоне дальностей; в расширении информативности сеанса – в аспекте существенного снижения или устранения неопределенности объекта по дальности для повышения темпа сходимости на этапе захвата или исключения этого этапа из циклограммы работы.

Научная цель – разработка и исследование унифицированного метода, совмещающего в рамках сеанса обнаружения функции «ускоренного» раскрытия слепых дальностей и дальнометрии обнаруженного объекта. В основе метода: опциональное расширение функциональных возможностей адаптивно-робастных процедур управления излучением и обработки измерений, традиционно используемых при захвате [3,4], для их применения в задачах раскрытия слепых зон, редукции или полного устранения неопределенности объекта по дальности на основе квазинаблюдений и одного реального измерения.

Постановка задачи

Рассматривается радар с типовыми параметрами излучения, приема и обработки сигналов в режиме ВЧПИ, например: $T_r = (10...15)$ мкс; дискрет ППИ $\delta T_r = (1/120)... (1/240)$ мкс; длительность импульса $\tau_{ppd} = (0,5...1)$ мкс; коэффициент заполнения $(1/Q)$ при $Q \geq 10$; время закрытия приемника $t_{cl\ start}$ и $t_{cl\ end}$ до и после импульса $t_{cl\ start} = t_{cl\ end} = t_{cl} = (0,1...0,15)$ мкс; общая ширина слепой зоны в ППИ $T_{BZ} = \tau_{ppd} + 2t_{cl\ start}$; $\lambda = 0,03$ м; количество импульсов в пачке $1024...4096$; временной дискрет дальности в ППИ $\delta\tau = \tau_{ppd} / (1...4)$.

Объект присутствует в зондируемом пространстве на расстояниях в диапазоне $[R_{min(0)}; R_{max(0)}]$, где $R_{min(0)} = 0,5 c (\tau_{ppd} + t_{cl})$ и $R_{max(0)} \approx 100$ км). Считается, что при нахождении задержки эхо-сигнала объекта в рабочей зоне ППИ (только на фоне шумов приемника) превышение порога обнаружения потенциально обеспечивается. В этом случае формируются точечные оценки τ_{ASD} и F_D , например, по центрам дискретов временных и частотных измерений, определяются расчетные дисперсии ошибок оценивания $D_{\tau_{ASD}}$ и D_{F_D} (с учетом отношения сигнал/шум, шумов дискретизации и квантования [5]). При этом задача этапа обнаружения в традиционном понимании считается решенной.



Рассматривается ситуация, когда при излучении пачки с ППИ $T_r(0)$ объект находится в одной из слепых полос шириной

$$\Delta R_{BR} = (c/2)T_{BZ}, \quad (1)$$

расположенных на кратных длительности ППИ расстояниях в интервале $[R_{min}(0); R_{max}(0)]$ с соответствующим индексным диапазоном

$$[r_{min}(0) = 1; r_{max}(0) = \text{int} \{ (2/cT_r(0)) R_{max}(0) \}], \quad (2)$$

где $\text{int}\{\cdot\}$ – операция взятия целой части числа.

Требуется при минимальном количестве пачек импульсов на этапе обнаружения при заданном диапазоне дальности обнаружения обеспечить: гарантированную наблюдаемость неоднозначной задержки эхо-сигнала объекта в рабочей зоне $[(\tau_{ppd} + t_{cl}); (T_r(i) - t_{cl})]$ для ППИ $T_r(i)$ ($i \geq 1$) при исходной ситуации, когда объект не обнаружен по начальной пачке с ППИ $T_r(0)$ вследствие его нахождения на слепой дальности; оценку текущей дальности (точечную $R(i)$ и интервальную $[R_{min}(i); R_{max}(i)]$) на основе однократного измерения неоднозначной задержки сигнала, выполненного на момент первоначального обнаружения объекта.

Подход к решению и метод

Значение ППИ для начальной пачки в сеансе обнаружения

$$T_r(0) = \text{round} \{ T_r / \delta T_r \} \delta T_r, \quad (3)$$

где $\text{round}\{\cdot\}$ – операция округления к ближайшему целому, $T_{r \min} \leq T_r(i) \leq T_{r \max}$ при заданных ограничениях по минимуму $T_{r \min}$ и максимуму $T_{r \max}$. Назначение T_r и других параметров излучения, в общем случае, может основываться на многокритериальной оптимизации, вопросы которой в рамках данной статьи не рассматриваются.

Как исходное принимается случайное значение T_r , полученное путем рандомизации на интервале $[T_{r \min}; T_{r \max}]$, что целесообразно в аспекте инвариантности решения поставленной задачи, а также может иметь практическое значение, например, для повышения помехозащищенности радара. В рассматриваемом случае, при гипотезе о наличии объекта, отсутствие обнаружения при $T_r(0)$ эквивалентно информации о нахождении объекта в слепой зоне T_{BZ} , которая в свою очередь, понимается как неоднозначное «квазиизмерение» (или «инверсное наблюдение») задержки сигнала. Оно менее точное и менее информативное в сравнении с частотно-временным измерением, доступным при реальном превышении порога обнаружения в рабочей зоне ППИ при известном отношении «сигнал/шум».

Положение реальной дальности объекта в слепых диапазонах с шириной $\Delta R_{BR} = (c/2)T_{BZ}$ является случайным. Предполагая равномерное распределение плотности вероятности [5, 6], оценками математического ожидания $\tau_{ASD}(0)$ и дисперсии $D_{\tau_{ASD}}(0)$ для задержки эхо-сигнала в ППИ считаются значения:

$$\tau_{ASD}(0) = 0.5T_{BZ} - t_{cl} \text{ и } D_{\tau_{ASD}}(0) \approx \{ (T_{BZ})^2 / 12 \} + \{ \delta \tau^2 / q_0 \}, \quad (4)$$

где q_0 – отношение сигнал/шум по амплитуде, которое для квазиизмерения непосредственно неизвестно, но: приближенно вычисляется при заданном пороге обнаружения и уровне шумов, определяемых при обработке сигналов по дискретам в рабочей зоне ППИ; может корректироваться с учетом отношения сигнал/шум, наблюдаемого в следующей пачке в случае обнаружения сигнала объекта (превышения порога).

При использовании понятия «неоднозначное квазиизмерение» и его оценок $\tau_{ASD}(0)$, $D_{\tau_{ASD}}(0)$ и при априорной информации в виде $[R_{min}(0); R_{max}(0)]$, $[r_{min}(0); r_{max}(0)]$ задача раскрытия слепых дальностей и дальнометрии в момент обнаружения объекта, по сути, сводится к постановке задач адаптивно-робастного захвата/сопровождения объекта по дальности и аналогичным способам решения [3,4]. Основные отличия состоят только в том, что: управление наблюдением (положением задержки эхо-сигнала в ППИ $T_r(i)$) осуществляется не на основе анализа реального измерения задержки, а исходя из положения и параметров квазиизмерения; при дальнометрии используется не два (как минимум) реальных измерения, а только одно, в совокупности с квазиизмерениями.



Аналогично [3,4] реализуется циклическая процедура с динамическим управлением ППИ для следующей пачки обнаружения. При этом приращение ППИ $|\Delta T_{r(i/i-1)}| = |T_{r(i)} - T_{r(i-1)}|$ является наибольшим из всех значений, при котором: прогноз $\tau_{\max}^{* ASD(i/i-1)}$, выполненный при максимальном приращении для оценки $\tau_{ASD(i-1)}$ гарантированно попадает в рабочую зону ППИ $T_{r(i)}$ при максимальном индексе ППИ $r_{\max(i-1)}$; прогноз $\tau_{\min}^{* ASD(i/i-1)}$ при минимальном индексе ППИ в наибольшей мере приближается к границе слепой зоны или выходит за нее.

Если при приращении $|\Delta T_{r(i/i-1)}| < T_{BZ}$ сигнал объекта в рабочей зоне ППИ не обнаружен, считается, что он все еще находится в слепой зоне T_{BZ} , но при этом неопределенность объекта по дальности значительно редуцируется. Ширина диапазона индексов $[r_{\min(i)}; r_{\max(i)}]$ при этом определяется отношением $(T_{BZ}/|\Delta T_{r(i/i-1)}|)$. На каждой итерации по мере увеличения приращения ППИ диапазон индексов продолжает резко сокращаться и в итоге вырождается при приращении $|\Delta T_{r(i/i-1)}| \geq T_{BZ}$. В этом случае все слепые дальности, кроме $[0; 0.5c(t_{cl} + \tau_{ppd})]$ м, являются раскрытыми и если сигнал объекта не выявлен, то сеанс обнаружения завершается принятием решения об отсутствии объекта в зондируемом пространстве.

Если объект обнаружен, то с использованием оценок по текущим частотно-временным измерениям ($\tau_{ASD(i)}$, $F_D(i)$, $D_{\tau ASD(i)}$, $D_{FD(i)}$) при $T_{r(i)}$ и $q_{0(i)}$, а также оценок по квазиизмерениям ($\tau_{ASD(k)}$, $D_{\tau ASD(k)}$) при $T_{r(k)}$, $0 \leq k < i$, выполняются следующие процедуры дальнометрии объекта в рамках сеанса обнаружения.

Из всех реализованных приращений $\Delta T_{r(i/k)}$ выбирается наибольшее.

Коррекция $\tau_{ASD(k)}$, $D_{\tau ASD(k)}$ с учетом смещения при скорости $V_{R(i)} = V_{R(k)} = 0.5\lambda F_{D(i)}$ на интервале времени $\Delta t_{i/k}$ между пачками и текущего отношения сигнал/шум:

$$\tau_{ASD(i/k)} = \tau_{ASD(k)} - 2(V_{R(i)} \Delta t_{i/k})/c; \quad (5)$$

$$D_{\tau ASD(i/k)} = D_{\tau ASD(k)} + \{(\Delta f^2/12) + (\lambda^2/4T_{sb} q_{0(i)})\} (\Delta t_{i/k} \lambda/c)^2, \quad (6)$$

где Δf – ширина доплеровского фильтра; T_{sb} – длительность пачки импульсов при ППИ $T_{r(i)}$

Оценка дальности при известных параметрах $\Delta r_{(i/k)} = r_{(i)} - r_{(k)}$ и $\Delta T_{r(i/k)}$:

$$r_{(k)} = \text{int} \{(\tau_{ASD(i/k)} - \tau_{ASD(i)} - \Delta r_{(i/k)} T_{r(k)}) / \Delta T_{r(i/k)}\}; \quad (7)$$

$$r_i = r_{(k)} + \Delta r_{(i/k)}; R_{(i)} = 0.5 c (r_i T_{r(i)} + \tau_{ASD(i)}). \quad (8)$$

Определение среднеквадратического отклонения $\sigma_{r(k)}$ для ошибок оценивания индекса ППИ и доверительного интервала для индексов ППИ:

$$\sigma_{r(k)} = \text{round} \{[(D_{\tau ASD(i/k)} + D_{\tau ASD(i)}) / (\Delta T_{r(i/i-1)})^2]^{1/2}\}; \quad (9)$$

$$[r_{\min(k)} = r_{(k)} - 3\sigma_{r(k)}; r_{\max(k)} = r_{(k)} + 3\sigma_{r(k)}], \quad (10)$$

где $\text{round}\{.\}$ – операция округления к ближайшему целому.

Для оценки $\tau_{ASD(i/k)}$ по квазиизмерению при известных $\Delta r_{(i/k)}$, $\Delta T_{r(i/k)}$, $T_{r(k)}$ формируются множества прогнозных значений и их отклонений от оценки по реальному измерения:

$$\{\tau_{ASDj(i/k)} = \tau_{ASD(i/k)} - \Delta r_{(i/k)} T_{r(k)} - r_{j(k)} \Delta T_{r(i/k)}\} \quad (11)$$

и

$$\{v_j = \tau_{ASDj(i/k)} - \tau_{ASD(i)}\} \quad (12)$$

при $j = r_{\min(k)}, \dots, r_{\max(k)}$.

Выбор значения $|v_j| = \min \{|v_j|\}$, уточнение индекса ППИ в виде $r_{(k)} = J$ и определение дальности, минимальной и максимальной дальности объекта по соотношениям:

$$\begin{aligned} r_i &= r_{(k)} + \Delta r_{(i/k)}; \\ R_{(i)} &= 0.5 c [r_{(i)} T_{r(i)} + \tau_{ASD(i)}]; \\ r_{\min(i)} &= (r_{(k)} - 3\sigma_{r(k)}) + \Delta r_{(i/k)}; \\ R_{\min(i)} &= 0.5 c [r_{\min(i)} T_{r(i)} + \tau_{ASD(i)}]; \\ r_{\max(i)} &= (r_{(k)} + 3\sigma_{r(k)}) + \Delta r_{(i/k)}; \\ R_{\max(i)} &= 0.5 c [r_{\max(i)} T_{r(i)} + \tau_{ASD(i)}]. \end{aligned}$$



Моделирование и анализ

На сквозной имитационной модели излучения, приема и обработки сигнала в импульсно-доплеровском радаре исследовались два положения объекта при излучения начальной пачки ($T_{r(0)}=14$ мкс, $\delta T_r=1/240$ мкс):

- 1 – в ближней слепой зоне при $r_{(0)}=1$ на расстоянии 2100 м;
- 2 – в дальней слепой зоне при $r_{(0)}=49$ на 105000 м.

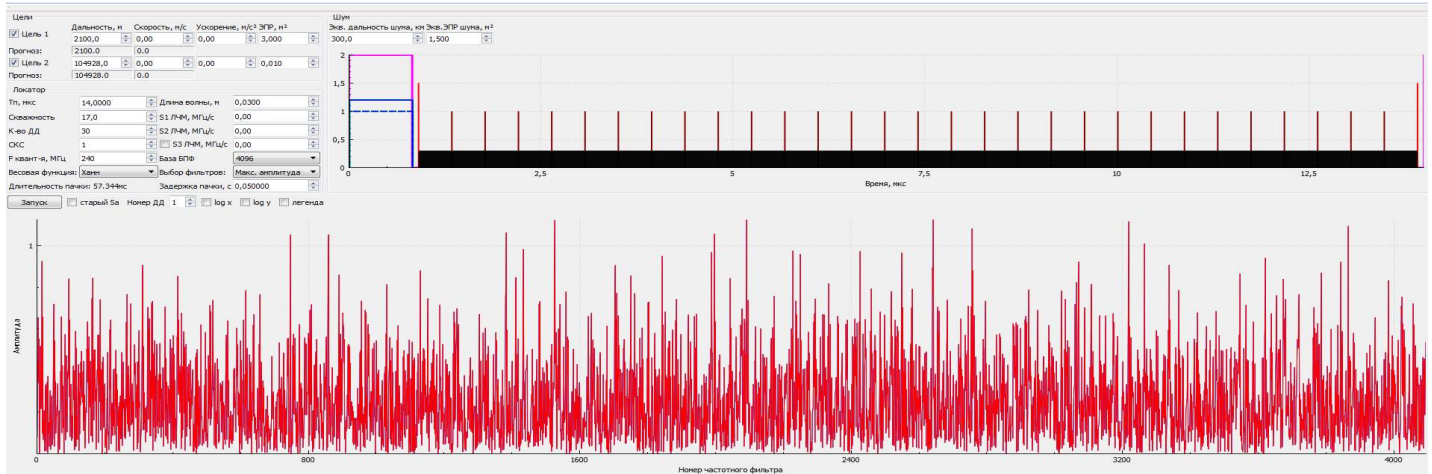


Рис. 1. Ненаблюдаемая задержка сигналов объекта в ближней и дальней слепой зоне при ППИ 14 мкс и частоты (шумы приемника) в каждом дискрете рабочей зоны ППИ



Рис. 2. Положение задержки сигнала, смещенного из ближней и дальней слепой зоны при ППИ 13,75 мкс (приращение $\Delta T_{r(i/i-1)} = -0,25$ мкс)

При этих и других расстояниях, кратных ППИ ($1 < r_{(0)} < 49$), положения задержки эхо-сигнала в ППИ (рис.1) практически исключают возможность обнаружения. На следующей пачке (рис.2) максимальное приращение $\Delta T_{r(i/i-1)} = -0,25$ мкс, $T_{r(i)} = 13,75$ мкс. При этом гарантированное обнаружение объекта в ближних зонах не обеспечивается, но значительно деградирует неопределенность по дальности объекта, т. к. удаленность нераскрытых слепых зон ограничивается уже существенно редуцированным диапазоном индексов ППИ:

$$[r_{min(i-1)} = 1; \\ r_{max(i-1)} = 1 + \text{round} \{ T_{BZ} / |\Delta T_{r(i/i-1)}| \} = 4],$$

что при $T_{BZ} \approx 0,825$ мкс и $T_{r(i)} = 13,75$ мкс соответствует зонам на удалениях $\approx$ (2065...8250 максимально удаленную, раскрыты. Если обнаружение не произошло, то принимается гипотеза о нахождении объекта в ближних зонах при $r_{(i)} \leq 4$.

На рис. 3 показано положение сигнала объекта при адаптации ППИ для редуцированного диапазона индексов ППИ [1;4]. При этом $T_{r(i+1)} = 11,2$ мкс, приращения ППИ: $\Delta T_{r(i+1/i)} = -2,45$ мкс; $\Delta T_{r(i+1/i-1)} = -2,8$ мкс. Видно, что рассматриваемые ближние слепые



зоны гарантированно раскрываются, объект наблюдаем и при соответствующей сигнально-шумовой обстановке будет обнаружен. Если во всех рассмотренных ситуациях (рис. 1, 2, 3) не было обнаружения, то считается, что в зондируемом пространстве объект отсутствует и сеанс обнаружения завершается. В том случае, если произошло обнаружение/частотно-временное измерение в удаленной (см. рис.2) или ближней (рис.3) наблюдаемой зоне, то реализуется описанная выше процедура дальнометрии по реальным $\tau_{ASD(i)}$ и гипотетическим $\tau_{ASD(i/k)}$ измерениям задержки сигнала. При моделируемых типовых параметрах ($\tau_{ppd} \approx 0,625$ мкс, $\delta\tau = \tau_{ppd}/2$, $t_{cl} \approx 0,1$ мкс, $T_{BZ} \approx 0,825$ мкс) среднее квадратическое отклонение (СКО) σ_{vi} для разностей прогноза и измерения задержки $v_i = (\tau_{ASD(i/k)} - \tau_{ASD(i)})$, в общем случае, составляет $\approx 0,25467$ мкс. При доверительной вероятности $P \approx 0,9973$ на уровне трех СКО диапазон ошибок определения индекса ППИ составляет $\pm \text{round} \{3\sigma_{vi}/|\Delta T_r(i/k)|\}$: в дальней зоне (при $4 < r_{(0)} \leq 49$, $\Delta T_r(1/0) = -0,25$ мкс) это ± 3 ; в ближней зоне (при $r_{(0)} \leq 4$, $\Delta T_r(2/0) = -2,8$ мкс) индекс ППИ определяется точно, а максимальная ошибка определения дальности объекта при этом превышает 50 м.

На рис. 3 также показаны дальномерные частоты и результаты дальнометрии по сигналам с инвертируемой линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), выполненной в ближней зоне ($r_{(0)} = 4$) и показавшей близкие по точности результаты [7].

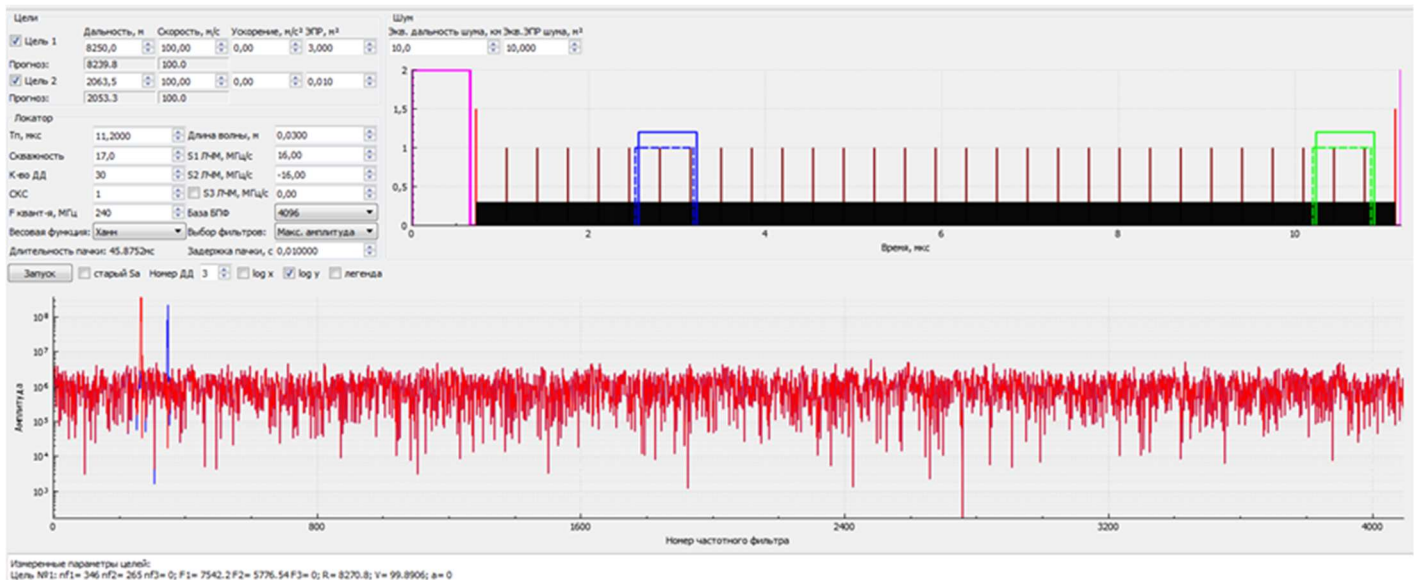


Рис. 3. Положение задержки сигнала, смещенного из ближних слепых зон при ППИ 11,2 мкс (приращения $\Delta T_r(i/i-1) = -2.45$ мкс и $\Delta T_r(i+1/i-1) = -2.8$ мкс)

Заключение

Разработанный метод адаптивно-робастное редукции неопределенностей по дальности на этапе поиска/обнаружения объекта позволяет в рамках этого этапа совместить решение задач раскрытия слепых дальностей и снижения/устранения неоднозначности измерения, полученного при первоначальном обнаружении объекта. Метод эффективен в аспектах: сокращения количества пачек в сеансе обнаружения в широком диапазоне дальностей - в 2-3 раза по сравнению с типовым перебором частот повторения); расширения информативности сеанса за счет дальнометрии, точность которой позволяет исключить из циклограммы этап захвата (традиционно требующий не менее 8-10 пачек) или выполнить далее адаптивно-робастный захват, также базирующийся на адаптивно-робастной редукции неоднозначности, с затратами не более 1-2 пачек импульсов.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по радиолокации: Том 3 / под ред. М Сколника; пер. с англ. под общей ред. К.Н. Трофимова. - М.: Сов. радио, 1978. – 528 с.
2. Авиационные радиолокационные комплексы и системы / Дудник П. И. [и др.] – М.: Изд. ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2006. – 1112 с.
3. *Коврегин В.Н., Коврегина Г.М.* Методы интегрированной дальнометрии в задачах радиолокационного захвата и сопровождения воздушных целей / В. Н. Коврегин, Г. М. Коврегина // Вопросы радиоэлектроники, серия: Радиолокационная техника. – 2008. – №1. – с. 61-68.
4. *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 // 28 th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 2021. Vol. 365 (1). P. 1-4. doi: 10.23919/ICINS43216.2021.
5. *Опенгейм Э.* Применение цифровой обработки сигналов / Э. Опенгейм; пер. с англ. под ред. А.М. Рязанцева. – Москва: Мир, 1980. – 550 с.
6. *Вентцель Е. С.* Прикладные задачи теории вероятностей / Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. - М: Радио и связь, 1983. — 416 с.
7. *Пат. RU 2 697 509 С2.* Способ обнаружения, измерения дальности и скорости низколетящей малоскоростной цели в импульсно-доплеровских радиолокационных станциях при высокой частоте повторения и инвертируемой линейной частотной модуляции / Коврегин В. Н., Коврегина Г. М. // Бюл. – 2019. - № 23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коврегин Валерий Николаевич -

Доцент кафедры «Аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов»
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: kovregin@mail.ru

Коврегина Галина Михайловна -

Доцент кафедры «Аэрокосмических измерительно-вычислительных комплексов»
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
190000, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: g_kovregina@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kovregin Valery Nikolaevich -

Docent of the Department of "Aerospace Measuring and Computing Complexes"
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: kovregin@mail.ru

Kovregina Galina Mikhailovna -

Docent of the Department of "Aerospace Measuring and Computing Complexes"
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
SUAI, 67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: g_kovregina@mail.ru