

А. Л. Ковтунов, С. П. Лещенко, д.т.н.

Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, г. Харьков

ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ОБЗОРНЫМИ РАДИОЛОКАТОРАМИ С ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СИГНАЛОВ С ШИРОКОЙ ПОЛОСОЙ ЧАСТОТ

Проведен анализ возможностей измерения радиальной скорости воздушной цели в пределах одной пачки сигналов с широкой полосой частот в обзорных РЛС с импульсным излучением и низкой частотой повторения зондирующих импульсов, которая не обеспечивает однозначное измерение радиальной скорости цели фазовыми методами.

Ключевые слова: первичная обработка, обзорные РЛС, широкая полоса частот, корреляция сигналов, радиальная скорость воздушной цели.

Введение

Постановка проблемы. Обзорные РЛС, предназначенные для локализации воздушных целей, как правило, измеряют только их дальность, азимут и угол места. При выборе частоты повторения зондирующих импульсов исходят, прежде всего, из условия однозначного измерения дальности до воздушной цели:

$$D_{max} < c / 2F_0. \quad (1)$$

где c – скорость света, F_0 – частота повторения зондирующих импульсов.

При этом удовлетворив требования (1), не обеспечивается однозначное измерение радиальной скорости воздушной цели или доплеровского сдвига по частоте в эхо-сигнале от цели:

$$F_0 > F_{0max} = 2|V_{rmax}| / \lambda. \quad (2)$$

где V_{rmax} – максимальная радиальная скорость цели, λ – длина волны РЛС.

Большинство обзорных РЛС, как правило, оценку радиальной скорости цели получают на этапе вторичной обработки радиолокационной

информации на не менее чем двух оборотах антенны РЛС по двум смежным оценкам дальности:

$$\tilde{V}_r = (r_2 - r_1) / T_0, \quad (3)$$

где r_2, r_1 – оценки дальности до цели, на смежных оборотах РЛС, T_0 – период обзора РЛС.

При получении оценки радиальной скорости маневрирующей воздушной цели по двум оценкам дальности возникают динамические ошибки вследствие нелинейного изменения радиальной скорости цели за период обзора РЛС (рис.1), что ухудшает вторичную обработку радиолокационной информации.

Анализ литературы. В обзорных РЛС предназначенных для локализации воздушных целей применяются зондирующие сигналы с шириной спектра 0,1...5 МГц. Такие сигналы обеспечивают разрешающую способность по дальности 30...1500 м. В этом случае воздушные цели имеющие размер 10...50 м, как правило, находятся в пределах одного элемента разрешения по дальности.

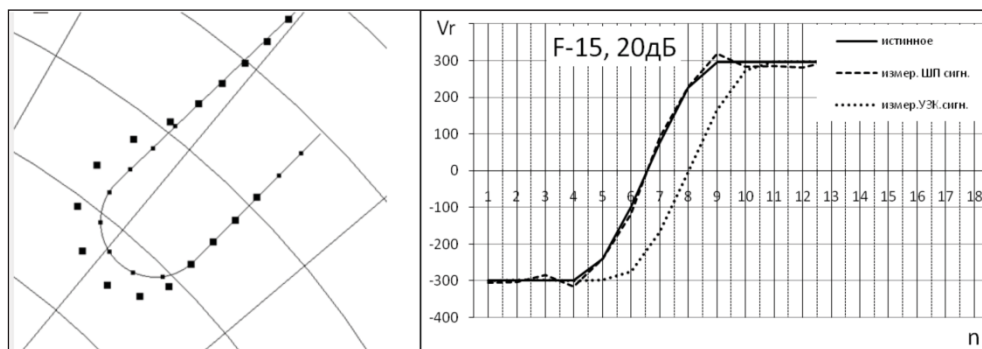


Рисунок 1 – Зависимости динамических ошибок измерения радиальной скорости от номера обзора РЛС и горизонтальная проекция траектории движения цели

В работе рассматривается возможность измерения радиальной скорости цели в обзорных РЛС с шириной спектра ЛЧМ сигнала 150-300 МГц, которая обеспечивает разрешающую способность 0,5...1 м.

В этом случае, в пределах геометрического размера цели находится несколько элементов разрешения по дальности, и отраженный от цели отклик представляет дальностный портрет (ДП) цели (в зарубежной литературе rang profile). Изначально такие сигналы предлагалось использовать для решения задачи радиолокационного распознавания воздушных целей [1, 2]. При этом решение "традиционных" задач радиолокационного обнаружения, измерения координат и сопровождения целей, предлагалось осуществлять с помощью узкополосных сигналов.

Основная часть

За период повторения широкополосных (ШП) зондирующих импульсов цель может пролетать расстояние, существенно превышающее размер элемента разрешения по дальности, при этом происходит смещение дальностных портретов в смежные элементы дальности, величина которого может быть измерена

$$vr_{ij} = \frac{\Delta L_{ij}}{\Delta t_{ij}}, \tag{4}$$

где ΔL_{ij} - смещение по дальности i -го ДП относительно j -го,

Δt_{ij} - интервал времени между получением i -го и j -го ДП. Если период следования зондирующих импульсов T_0 в РЛС не меняется (т.е. возбуждения не используется)

$$\Delta t_{ij} = (i - j) \cdot T_0. \tag{5}$$

Измерение смещения ДП дает возможность производить оценку радиальной скорости ВЦ в пределах одной пачки ШП сигналов. На рис. 2 показана, полученная в результате моделирования пачка ДП от самолета Ту-16 [2]. Можно заметить, что временная задержка ДП в пачке имеет связь с радиальной скоростью цели.

В [3] предложен метод получения оценки радиальной скорости воздушной цели, который реализуется путем анализа временной задержки величин коэффициентов взаимной ковариации ДП в пределах обнаруженной пачки относительно ДП $\dot{A}_{\frac{M}{2^n}}$, который соответствует середине диаграммы направленности антенны.

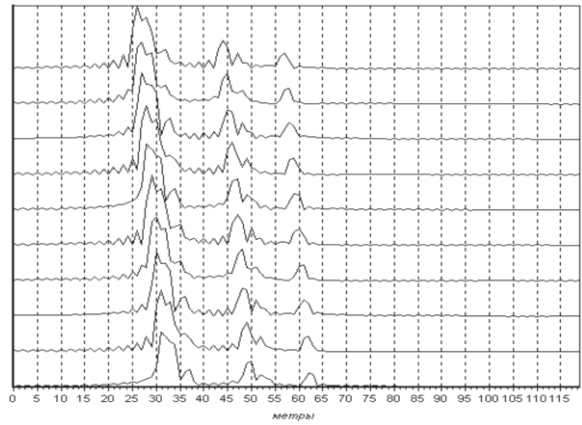


Рисунок 2 – Пачка ДП от самолета Ту-16, летящего со скоростью 800 км/ч, при частоте повторения РЛС 365 Гц

Оценка радиальной скорости производится на основе обработки запомненных ДП \dot{A}_{m_i} в пределах обнаруженной пачки ШП сигналов. Рассчитываются коэффициенты взаимной ковариации ДП обнаруженной пачки, с центральным ДП

$$K'_m = \max_i \frac{1}{W(i)} \sum_{n=N1(i)}^{N2(i)} \left| \dot{A}_{\frac{M}{2^n}} \cdot \dot{A}_{(m)(n+i)} \right|, \tag{6}$$

где $-LM/2 \leq i \leq LM/2$, $N1(i) = \max\{1, 1-i\}$, $N2(i) = \min\{N, N-i\}$, $W(i) = N2(i) - N1(i)$.

L – максимальная величина количества дискрет, на которые смещается принятый сигнал, относительно опорного и зависит от максимальной радиальной скорости цели, периода повторения зондирующих импульсов T_0 и длительности дискреты дальности

$$L = (V_{pmax} \cdot T_0) / \Delta_d. \tag{7}$$

M – количество импульсов в пачке, которое рассчитывалось по формуле

$$M = \frac{\theta \cdot F_0}{6 \cdot n}, \tag{8}$$

где n – скорость вращения антенны, θ – ширина диаграммы направленности антенны.

При вычислении коэффициентов взаимной ковариации фиксируется вектор значений сдвигов ДП относительно центрального ДП, при которых значения взаимнокорреляционных функции достигают максимальных значений:

$$\Delta L_m = |\Delta L_1, \Delta L_2 \dots \Delta L_{M-1}|, \tag{9}$$

В результате того, что ДП обнаруженной пачки от импульса к импульсу смещаются на одинаковые интервалы дальности, зависимость в пределах пачки (рис. 4, 30 дБ) имеет линейный участок. Линейный участок зависимости показывает, насколько дискрет Δl происходит задержка воздушной цели по дальности в зависимости от значения радиальной скорости и номера импульса пачки m .

Для обнаружения линейного участка вектора ΔL_m двигаясь от значения $\Delta L_{M/2}$, которое соответствует середине ДН антенны, влево и вправо рассчитываются величины равные:

$$j_1 = |\Delta L_m - \Delta L_{m+1}|; \quad j_2 = |\Delta L_m - \Delta L_{m-1}|;$$

$$J_1 = \sum_{m=1}^{+M/2} |\Delta L_m - \Delta L_{m+1}|; \quad J_2 = \sum_{m=1}^{-M/2} |\Delta L_m - \Delta L_{m-1}|. \quad (10)$$

После чего производится их сравнение с пороговыми значениями:

$$j_1 < L; \quad j_2 < L;$$

$$J_1 < L \cdot M / 2; \quad J_2 < L \cdot M / 2; \quad (11)$$

где L – величина, рассчитываемая по формуле (7).

По первому превышению порога соответствующими величинами принимаем решение о начале и конце линейного участка вектора ΔL_m .

Может возникнуть ситуация, когда на обнаруженном участке имеются нелинейности, не превышающие пороговые значения. Такое явление может наблюдаться при низком отношении сигнал-шум или сильном проявлении эффектов "турбинной" модуляции эхо-сигналов. Пример зависимости ΔL_m от числа зондирований m рассчитанной для модели В-52, которая наблюдается под ракурсом $115,6^\circ$ и отношении 30 дБ, показан на рис. 3. Поэтому, значения обнаруженного линейного участка вектора ΔL_m сглаживаем методом наименьших квадратов и рассчитываем коэффициенты a и b для аппроксимации закона зависимости ΔL_m от m линейной функцией

$$\Delta l = a \cdot m + b.$$

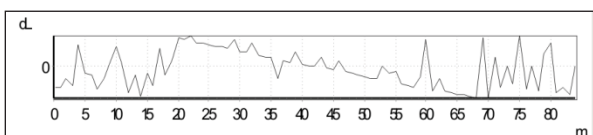


Рисунок 3 – Зависимости ΔL_m от числа зондирований m

Оценка радиальной скорости воздушной цели производится по соотношению

$$\hat{V}_p = (\Delta l \cdot \Delta_d) / m \cdot T_0, \quad (12)$$

где T_0 – период повторения импульсов.

Снижение отношения сигнал-шум приводит к укорачиванию линейного участка измерения, что приводит к увеличению ошибки измерения. Примеры зависимости ΔL_m от m рассчитанные для модели самолета F-15, который летит со скоростью 300 м/с и курсом 0° для разных отношений сигнал-шум показаны на рис. 4. При малых значениях сигнал-шум алгоритм не позволяет делать оценку радиальной скорости цели из-за отсутствия линейного участка вектора ΔL_m . Для реализации данного метода необходимо не менее трех значений ΔL_m связанных между собой линейной зависимостью. Поэтому при отсутствии линейного участка, измерение скорости становится невозможным.

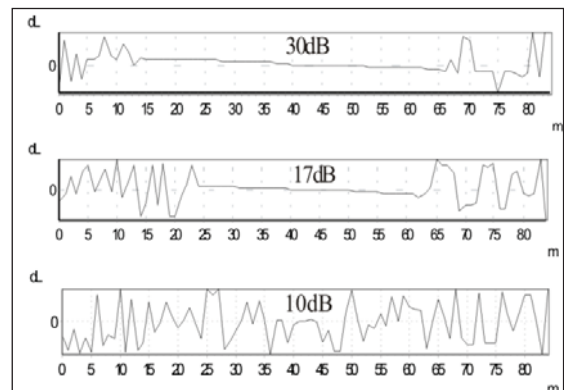


Рисунок 4 – Зависимости ΔL_m от числа зондирований m для разных отношений сигнал-шум

Моделирование с использованием программы [4] показало, что роторная (турбинная) модуляция отраженного ШП сигнала оказывает значительное влияние на взаимную корреляцию ДП в обнаруженной пачке. Из-за роторной (турбинной) модуляции снижение взаимной корреляции ДП в пачке ШП сигналов возможно даже при высоких отношениях сигнал-шум, что приводит к укорачиванию линейного участка и возрастанию ошибки измерения радиальной скорости цели.

На рис. 5 представлены, полученные путем моделирования зависимости полученных оценок радиальной скорости В-52, летящих со скоростью 300 м/с, от ракурса при отношении

сигнал-шум 30 дБ, а также соответствующие им зависимости усредненных в пачке значений коэффициентов взаимной корреляции ДП от курса.

Заметно, что при зондировании РЛС в переднюю полусферу воздушной цели влияние турбинной модуляции приводит к снижению межпериодной корреляции ДП в обнаруженной пачке ШП сигналов и увеличению ошибок измерения радиальной скорости цели. Анализ характера зависимости СКО ошибок измерения радиальной скорости от ракурса модели В-52 показал, что при отсутствии влияния турбинной (роторной) модуляции (зондирование ВЦ в заднюю полусферу рис. 6 курс $q=0^\circ$) ошибки измерения минимальны, при этом обеспечивается высокая корреляция ДП в обнаруженной пачке. При зондировании ВЦ в переднюю полусферу ошибки зависят от взаимного положения компрессоров турбореактивных двигателей относительно РЛС.

Ошибки измерения радиальной скорости заметно возрастают на курсах, когда турбореактивные двигатели в момент зондирования расположены в разных элементах дальности (рис. 6, $q=115^\circ$). Уменьшение ошибок измерения на встречных ракурсах происходит тогда, когда двигатели равноудалены от РЛС, то есть, расположены в одном элементе дальности (рис. 6, $q=135^\circ$).

Оценку усредненного показателя межпериодной корреляции ДП обнаруженной пачки ШП сигнала можно найти при обработке каждой обнаруженной пачки ШП сигнала скользящим «окном» по азимуту, размер которого равняется числу ДП в пачке по выражениям (13–19):

$$\tilde{r} = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^{M-1} \dot{U}_\theta[m] \cdot r_m \quad (13)$$

где

$$r_m = \frac{(K_{1m} - K_{4m} \cdot K_{5m} / W(i))}{[(K_{2m} - K_{4m} / W(i))^2 \cdot (K_{3m} - K_{5m} / W(i))^2]^{1/2}}; \quad (14)$$

$$K_{1m} = \max_i \sum_{n=N1(i)}^{N2(i)} |\dot{A}_{im}| \cdot |\dot{A}_{(m+1)(n+i)}|; \quad (15)$$

$$K_{2m} = \max_i \sum_{n=N1(i)}^{N2(i)} |\dot{A}_{im}| \cdot |\dot{A}_{m(n+i)}|; \quad (16)$$

$$K_{3m} = \max_i \sum_{n=N1(i)}^{N2(i)} |\dot{A}_{(m+1)n}| \cdot |\dot{A}_{(m+1)(n+i)}|; \quad (17)$$

$$K_{4m} = \max_i \sum_{n=N1(i)}^{N2(i)} |\dot{A}_{m(n+i)}|; \quad (18)$$

$$K_{5m} = \max_i \sum_{n=N1(i)}^{N2(i)} |\dot{A}_{(m+1)(n+i)}|; \quad (19)$$

$\dot{U}_\theta[m]$ – нормировочные коэффициенты, которые соответствуют форме диаграммы направленности антенны.

На рис. 7 представлены полученные путем моделирования графики зависимости СКО измерения радиальной скорости от отношения сигнал-шум для трех типов целей. Как видно из графиков, при отношении сигнал-шум 18-20 дБ (в зависимости от типа цели) обеспечивается точность измерения радиальной скорости не хуже 25 м/с.

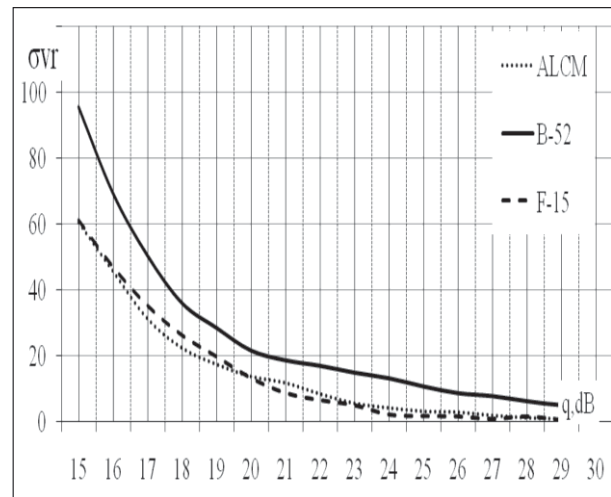


Рисунок 7 - Зависимость усредненной по ракурсам СКО измерения радиальной скорости от отношения сигнал-шум и типа воздушной цели

Также из анализа полученных результатов следует, что точность измерения радиальной скорости не хуже 25 м/с обеспечивается при условии, что оценка усредненного показателя межпериодной корреляции ДП обнаруженной пачки ШП сигналов не менее 0,35-0,45.

Необходимо отметить, что вращение лопастей двигателя вертолета модулирует амплитуду ДП в пачке ШП сигналов на всех ракурсах, что приводит к значительному снижению корреляции смежных ДП в обнаруженной пачке ШП сигналов. Моделирование показало, что измерение радиальной скорости вертолета происходит с большими ошибками, а на некоторых ракурсах измерение становится невозможным.

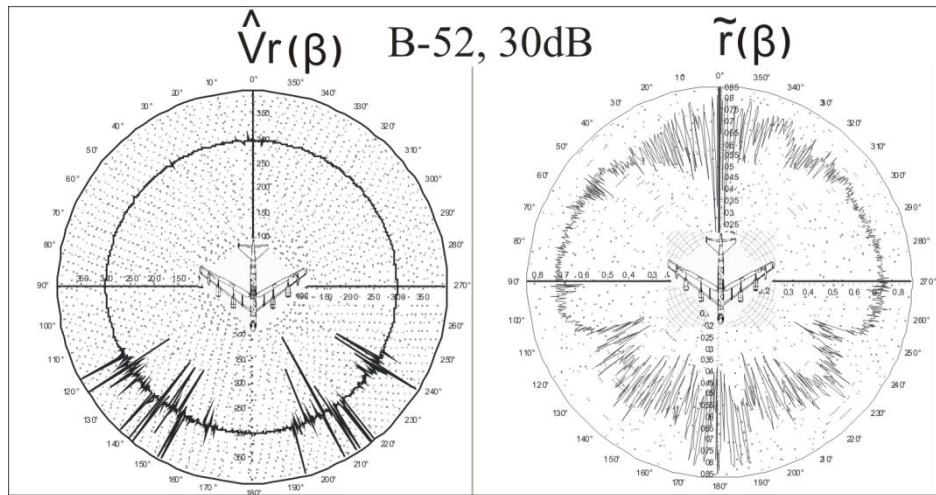


Рисунок 5 - Зависимости ошибки измерения радиальной скорости и коэффициента взаимной корреляции ДП в пачке ШП сигналов от ракурса

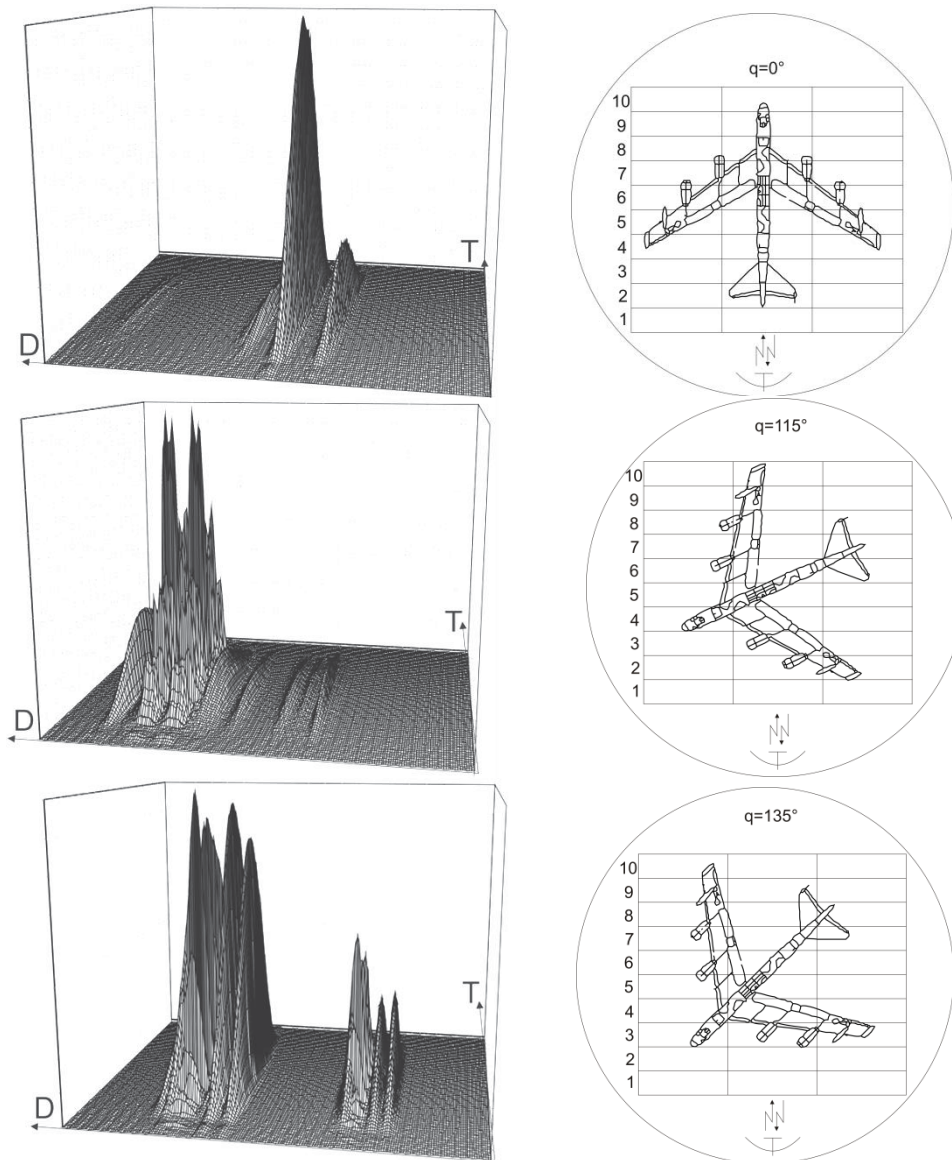


Рисунок 6 - Пример пачек ДП ШП сигналов отраженных от модели B-52 в зависимости от ее ракурса

Выводы

Применение в обзорных РЛС с импульсным излучением сигналов с широкой полосой частот, которая обеспечивает разрешение воздушных целей по дальности, позволяет получать оценку радиальной скорости в пределах одной пачки сигналов. При отношении сигнал-шум более 18-20 дБ и величине усредненного показателя межпериодной корреляции ДП обнаруженной пачки ШП сигналов более 0,35-0,45 обеспечивается СКО ошибок измерения радиальной скорости менее 25 м/с.

Учет, полученной оценки радиальной скорости позволяет улучшить методы вторичной обработки радиолокационной информации на этапах, как обнаружения, так и сопровождения трасс воздушных целей. Дополнительная информация о радиальной скорости цели может позволить более точное оценивание параметров траектории цели, особенно при интенсивном ее маневрировании. Кроме того информация о радиальной скорости цели может быть использована для уменьшения неопределенности при установлении корреляционных связей между отметками и траекториями в сложных ситуациях.

А. Л. Ковтунов, С. П. Лещенко, д.т.н.

**МОЖЛИВОСТІ ВИМІРУ РАДІАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ОГЛЯДОВИМИ
РАДІОЛОКАТОРАМИ З ІМПУЛЬСНИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ПРИ ВИКОРИСТАННІ
СИГНАЛІВ ІЗ ШИРОКОЮ СМУГОЮ ЧАСТОТ**

Проведено аналіз можливостей виміру радіальної швидкості повітряної цілі в межах однієї пачки сигналів із широкою смугою частот в оглядових РЛС із імпульсним випромінюванням і низькою частотою повторення зондувальних імпульсів, що не забезпечує однозначний вимір радіальної швидкості цілі фазовими методами.

Ключові слова: первинна обробка, оглядові РЛС, широка смуга частот, кореляція сигналів, радіальна швидкість повітряної цілі.

A. L. Kovtunov, S. P. Leshenko, DSc

**ABILITY TO MEASURE THE RADIAL VELOCITY OF SURVEILLANCE RADAR WITH A
PULSED RADIATION WITH WIDE BANDWIDTH SIGNALS**

The analysis of the radial velocity measurement capability in aerial target surveillance radars using broadband signals. Measurement was carried out in the range of one reflected packet. Thus the frequency of probing pulses fail to measure radial speed with phases methods.

Keywords: primary processing, surveillance radars, wide frequency band, the correlation of signals, the radial velocity of air target.

Список использованных источников

1. Ширман Я. Д. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я. Д. Ширман, С. А. Горшков, С. П. Лещенко, Братченко Г. Д. и др. // Радиолокация и радиометрия. – № 2 – М.: Радиотехника, 2000. – С. 5–65.

2. Лещенко С. П. Развитие теории и техники радиолокационного распознавания воздушных целей / С. П. Лещенко // Прикладная радиоэлектроника, 2009. – Т. 8.– Вып. 4. – С. 490–496.

3. Ковтунов А. Л. Методи виявлення широкосмугових сигналів та виміру радіальної швидкості цілі в оглядових РЛС / А. Л. Ковтунов, С. П. Лещенко // Збірник наукових праць ХУПС. – Х.: ХУПС, 2012. – Вип. 4(33). – С. 78–81.

4. Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual / Gorshkov S. A., Leshchenko S. P., Orlenko V. M., Sedyshev S. Yu, Shirman Y. D. – Boston-London: Artech House, 2002. – 71 p.

Поступила в редакцію 19.12.2013

Рецензент: д.т.н, проф. О. І. Сухаревський, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, м. Харків.