

**ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ, РАДІОЛОКАЦІЯ,
РАДІОНАВІГАЦІЯ ТА ЕЛЕКТРОАКУСТИКА**

УДК 621.396.96

**ОБНАРУЖЕНИЕ ЦЕЛИ В ИМПУЛЬСНО-ДОПЛЕРОВСКОЙ РЛС
НА ОСНОВЕ МНОГООБЗОРНОГО НАКОПЛЕНИЯ СИГНАЛОВ**

*Неуймин А. С., аспирант; Жук С. Я., д.т.н., профессор
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

**TARGET DETECTION IN PULSE-DOPPLER RADAR BASED ON MULTI-
SCANNING SIGNAL INTEGRATION**

*Neuimin O., postgraduate student; Zhuk S., Doc. Of Sci (Technics), Professor
National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

Введение

Накопление сигналов широко используется при решении задач оптимального приема в различных радиоэлектронных системах [1]. Для обнаружения движущихся объектов на последовательности изображений алгоритмы накопления и сопровождения используются совместно и получили название «сопровождение до обнаружения» (track-before-detect) [2]. В работе [3] данный подход предложено использовать для обнаружения траектории цели в обзорных радиолокационных станциях (РЛС) путем многообзорного некогерентного накопления сигналов. Представляет интерес разработка алгоритмов многообзорного накопления сигналов импульсно-доплеровскими (ИД) РЛС, которые находят широкое распространение на практике.

Цель статьи. В работе получен двухэтапный алгоритм, основанный на многообзорном некогерентном накоплении сигналов в ИД РЛС. В каждом обзоре на первом этапе выполняется первичное обнаружение сигналов с достаточно высокой вероятностью ложной тревогой. На втором этапе для выделения отметок цели решается задача сопровождения и осуществляется межобзорное накопление сигналов. Решение о наличии цели принимается по накопленной статистике за K обзоров. Эффективность алгоритма исследована на модельном примере.

Постановка задачи

Рассматривается задача многообзорного накопления при измерении координат дальности r и радиальной скорости \dot{r} . Отраженный от цели сигнал представляет собой когерентную пачку радиоимпульсов со случайной начальной фазой и известной амплитудой, искаженную белым шу-

мом [1]. Полагается, что сигнал цели попадает в свободную от мешающих отражений зону, а также задача устранения неоднозначности измерений по дальности и по скорости решена.

На k -ом обзоре в результате когерентно-доплеровской фильтрации сигналов в каждом элементе разрешения по дальности и радиальной скорости определяется нормированная достаточная статистика \bar{Z}_k [4]. При отсутствии цели \bar{Z}_k подчиняется закону Релея

$$P(\bar{Z}_k) = \bar{Z}_k \exp\left\{-\frac{\bar{Z}_k^2}{2}\right\}, \quad (1)$$

а при наличии — закону Райса

$$P(\bar{Z}_k) = \bar{Z}_k \exp\left\{-\frac{\bar{Z}_k^2 + q^2}{2}\right\} I_0\{\bar{Z}_k \cdot q\}, \quad (2)$$

где $\bar{Z}_k = Z_k / \sigma_n$; Z_k — достаточная статистика в элементе разрешения по дальности и по скорости на k -ом обзоре; σ_n^2 — дисперсия шума на выходе одного канала корреляционно-фильтрового приемника; $I_0\{\bullet\}$ — функция Бесселя нулевого порядка; $q = E_s / \sigma_n$ — отношение сигнал/шум; E_s — энергия сигнала. Полагается, что отношение сигнал/шум не меняется от обзора к обзору.

В каждом обзоре выполняется первичное обнаружение сигналов путем сравнения достаточной статистики \bar{Z}_k с входным порогом H_{ex} , выбор которого проводится в соответствии с требуемой вероятностью ложной тревоги F_1^{ex} .

При превышении \bar{Z}_k порога H_{ex} формируется отметка $y_k = (r_k^u, \dot{r}_k^u)$, которая может быть как целевой, так и ложной. С каждой полученной отметкой связывается соответствующая ей достаточная статистика \bar{Z}_k .

Обнаружение цели в последовательности из K обзоров выполняется путем сравнения накопленной статистики \bar{Z}_Σ с выходным порогом $H_{вых}$. Оно сводится к задаче обнаружения траектории цели и заключается в проверке двух альтернативных гипотез: H_0 - гипотезы об отсутствии цели (подтверждение ложности сопровождаемой траектории) и H_1 - гипотезы о наличии цели (подтверждении истинности сопровождаемой траектории).

Разработка двухэтапного алгоритма многообзорного некогерентного накопления сигнала

Для обнаружения траектории цели предлагается использовать алгоритм обнаружения по критерию K / K [5], в котором наряду с измеренными координатами $y_k = (r_k^u, \dot{r}_k^u)$ также учитываются достаточные статистики \bar{Z}_k .

Для выделения траектории цели используется простейший алгоритм сопровождения, основанный на гипотезе движения слабо маневрирующей цели [5]. Экстраполяция координат i -ой отметки r^{*i}, \dot{r}^{*i} на следующий обзор выполняется с помощью уравнений

$$\begin{aligned} r^{*i} &= r_u^i + \dot{r}_u^i T, \\ \dot{r}^{*i} &= \dot{r}_u^i, \end{aligned}$$

где r_u^i, \dot{r}_u^i — измеренные значения дальности и радиальной скорости i -ой отметки соответственно.

Дисперсии ошибки прогноза дальности и скорости вычисляются как

$$\begin{aligned} \sigma_r^{*2} &= \sigma_r^2 + \sigma_{\dot{r}}^2 T^2 + \frac{\sigma_a^2 T^4}{4}, \\ \sigma_{\dot{r}}^{*2} &= \sigma_{\dot{r}}^2 + \sigma_a^2 T^2, \end{aligned}$$

где $\sigma_r^2 = \frac{\Delta r^2}{12}$ — дисперсия ошибки измерения дальности; $\sigma_{\dot{r}}^2 = \frac{\Delta \dot{r}^2}{12}$ — дисперсия ошибки измерения скорости; $\Delta r, \Delta \dot{r}$ — размеры элементов разрешения по дальности и по скорости соответственно; σ_a^2 — дисперсия ускорения цели по дальности.

Дисперсии невязок измерений по дальности и скорости, используемые для определения размеров стробов сопровождения определяются по формулам

$$\begin{aligned} \sigma_{sr}^2 &= \sigma_r^{*2} + \sigma_r^2, \\ \sigma_{s\dot{r}}^2 &= \sigma_{\dot{r}}^{*2} + \sigma_{\dot{r}}^2. \end{aligned}$$

При попадании в строб несколько отметок, для дальнейшего сопровождения выбирается отметка с максимальным значением статистики \bar{Z}_k . Если в строб не попадает ни одна отметка, то траектория снимается с сопровождения.

В отличие от задачи обнаружения траектории, рассмотренной в [5], также осуществляется некогерентное межобзорное накопление достаточных статистик по формуле

$$\bar{Z}_\Sigma = \sum_{k=1}^K \bar{Z}_k^2. \quad (3)$$

Накопленные за K обзоров достаточные статистики \bar{Z}_Σ , соответствующие полученным траекториям, сравниваются с выходным порогом $H_{вых}$. Если накопленная статистика $\bar{Z}_\Sigma \geq H_{вых}$, то принимается гипотеза H_1 , в противном случае - H_0 .

Для принятой модели отраженного от цели сигнала в виде когерентной пачки радиоимпульсов со случайной начальной фазой и известной амплитудой решающая статистика (3) обеспечивает оптимальное решение задачи обнаружения последовательности отраженных сигналов за K обзоров при малых отношениях сигнал-шум [1].

Вероятность правильного обнаружения траектории описывается выражением

$$D_{\Sigma} = (D_1^{ex})^K (P_{str})^{K-1} (P_{sopr})^{K-1} D_{вых}^{ysl}, \quad (4)$$

где D_1^{ex} — вероятность превышения статистикой отметки цели \bar{Z}_k порога H_{ex} в обзоре; P_{str} — вероятность попадания отметки цели в строб; P_{sopr} — вероятность того, что в стробе на сопровождение будет взята отметка от цели; $D_{вых}^{ysl}$ — условная вероятность превышения порога $H_{вых}$ накопленной статистикой \bar{Z}_{Σ} , при условии, что статистики отметок цели \bar{Z}_k превысили порог H_{ex} в каждом обзоре.

Для рассмотренной модели сигнала цели (2) D_1^{ex} вычисляется по формуле

$$D_1^{ex} = \int_{H_{ex}}^{\infty} \bar{Z}_k \exp\left\{-\frac{\bar{Z}_k^2 + q^2}{2}\right\} I_0\{\bar{Z}_k q\} d\bar{Z}_k.$$

Вероятность P_{sopr} определяется по формуле

$$P_{sopr} = P_0 + \sum_m P_m P_{stat,m},$$

где P_m — вероятность появления в стробе m ложных отметок; $P_{stat,m}$ — вероятность того, что статистика отметки цели \bar{Z}_k превышает статистики m ложных отметок в стробе сопровождения.

Вероятность ложного обнаружения F_{Σ} траектории описывается выражением

$$F_{\Sigma} = F_1^{ex} (F_{str})^{K-1} F_{вых}^{ysl},$$

где F_1^{ex} — вероятность превышения статистики ложной отметки \bar{Z}_k порога H_{ex} на первом обзоре; F_{str} — вероятность появления хотя бы одной ложной отметки в стробе сопровождения; $F_{вых}^{ysl}$ — условная вероятность превышения порога $H_{вых}$ накопленной статистикой \bar{Z}_{Σ} , при условии, что для сопровождения используются ложные отметки с максимальной статистикой \bar{Z}_k .

Порог H_{ex} определяется по заданной вероятности ложной тревоги F_1^{ex} с помощью выражения [1]

$$H_{ex} = \sqrt{-2 \ln(F_1^{ex})}.$$

В общем случае аналитические выражения показателей эффективности алгоритма многоэтапного накопления F_Σ , D_Σ могут быть получены путем статистического моделирования на ЭВМ. В некоторых частных случаях удается аналитически получить их граничные значения.

Результаты моделирования

Анализ разработанного алгоритма многообзорного некогерентного накопления сигнала выполнен с помощью статистического моделирования на ЭВМ. Темп поступления данных полагался $T=1$ с. Размер элементов разрешения $\Delta r \times \Delta \dot{r} = 150\text{м} \times 10\text{м/с}$. Дисперсия ошибки измерения РЛС $\sigma_r^2 = 1875\text{м}^2$, $\sigma_{\dot{r}}^2 = 8.33(\text{м/с})^2$. Для описания движения цели использовалась модель второго порядка

$$u_k = F_{k,k-1}u_{k-1} + G_k \omega_k,$$

где $u_k = (r_k, \dot{r}_k)^T$ — вектор, включающий дальность r_k и радиальную скорость \dot{r}_k ; $F_{k,k-1} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; $G_k = \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T \end{bmatrix}$; ω_k - шум возбуждения с корреляционной матрицей $Q_k = \text{diag}(\sigma_a^2, \sigma_a^2)$.

СКО шума возбуждения ω_k , характеризующего случайное ускорение цели, полагалось $\sigma_a = 2\text{м/с}^2$, что соответствует типу движения близкому к равномерному. Область обзора состоит из $L_r \times L_{\dot{r}} = 20 \times 20 = 400$ элементов разрешения.

При заданной вероятности ложной тревоги $F_1^{ex} = 10^{-1}$ величина нижнего порога равна $H_{ex} = 2.146$. При этом вероятность правильного обнаружения $D_1^{ex} = 0.99$, а отношение сигнал/шум $q=4.31$.

Вероятность попадания в стробы отметок цели P_{str} принималась равной единице. Вероятность появления в стробе m ложных отметок P_m определяется по закону Пуассона с математическим ожиданием $\lambda = L_r L_{\dot{r}} F_1^{ex} (1 - F_1^{ex})$

$$P_m = \frac{\lambda S^m}{m!} \exp(-\lambda S),$$

где $S = 0.016$ — размер строба в относительных единицах.

Для рассмотренного примера вероятность появления четырех отметок в стробе сопровождения $P_4 = 0.003$, поэтому ограничимся рассмотрением ситуации, при которой в стробе может находиться не более трех ложных

отметок. Следуя методике [6] с использованием законов распределения (1), (2), путем численного интегрирования получены вероятности того, что статистика отметки цели \bar{Z}_k превышает статистики одной $P_{stat,1} = 0.972$, двух $P_{stat,2} = 0.954$ и трех $P_{stat,3} = 0.94$ ложных отметок в строке сопровождения. Соответственно вероятность того, что в строке на сопровождение будет взята отметка цели $P_{sopr} \approx 0.983$.

При $D_1^{6x} = 0.99$ условную вероятность D_{6bx}^{ysl} можно заменить безусловной вероятностью D_{6bx} , которая описывается выражением [7]

$$D_{6bx} = \frac{1}{2} \int_{H_{6bx}}^{\infty} \left(\frac{\bar{Z}_{\Sigma}}{Kq^2} \right)^{\frac{K-1}{2}} \exp \left\{ -\frac{\bar{Z}_{\Sigma} + Kq^2}{2} \right\} I_{K-1} \left\{ \sqrt{Kq^2 \bar{Z}_{\Sigma}} \right\} d\bar{Z}_{\Sigma},$$

где $I_{K-1} \{ \bullet \}$ — функция Бесселя $(K-1)$ -го порядка.

С учетом рассмотренного выше, граничное значение для вероятности правильного обнаружения D_{Σ} (4) принимает вид

$$D_{\Sigma} = [0.99]^K \cdot (1)^{K-1} \times (0.983)^{K-1} \times \frac{1}{2} \int_{H_{6bx}}^{\infty} \left(\frac{\bar{Z}_{\Sigma}}{Kq^2} \right)^{\frac{K-1}{2}} \exp \left\{ -\frac{\bar{Z}_{\Sigma} + Kq^2}{2} \right\} I_{K-1} \left\{ \sqrt{Kq^2 \bar{Z}_{\Sigma}} \right\} d\bar{Z}_{\Sigma}, \quad (5)$$

На основе выражения (5) получено значение порога $H_{6bx}^{теор}$ при разных значениях числа обзоров K , обеспечивающего $D_{\Sigma} = 0.88$. В табл. 1 приве-

дены полученные с помощью метода Монте-Карло $D_{\Sigma эксп}$ — вероятность правильного обнаружения истинной траектории,

Таблица 1

K	1	2	3	4	5
$H_{6bx}^{теор}$	10.4	25.06	39.56	52.72	60.85
$D_{\Sigma эксп}$	0.888	0.899	0.901	0.9	0.898
$F_{\Sigma эксп}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2.6 \cdot 10^{-6}$	$2.4 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$
Q , дБ	0	1.71	2.83	3.52	3.64

$F_{\Sigma эксп}$ — вероятность

ложной тревоги, Q — выигрыш в отношении сигнал/шум, который вычисляется по формуле

$$Q = 20 \lg \frac{q_{K=1}}{q_{K>1}},$$

где $q_{K>1}$ — отношение сигнал/шум при $K > 1$ обзорах; $q_{K=1}$ — отношение сигнал/шум при принятии решения в текущем обзоре, необходимое для получения $F_{\Sigma эксп}$ и $D_{\Sigma эксп}$, которые достигаются при $K > 1$ обзорах.

Из таблицы видно, что $F_{\Sigma_{експ}}$ существенно уменьшается при увеличении количества обзоров, что позволяет получить выигрыш в отношении сигнал/шум по сравнению с обнаружением в одном обзоре до 3.5 дБ. Вероятность правильного обнаружения истинной траектории $D_{\Sigma_{експ}}$ близка к теоретическому значению $D_{\Sigma} = 0.88$. Незначительные отличия обусловлены использованием вместо условной вероятности $D_{вых}^{усл}$ в выражении (4) безусловной вероятности $D_{вых}$.

В табл. 2 при разных значениях числа обзоров K приведены характеристики сопровождения цели: $P_{срыва}$ — вероятность срыва сопровождения цели, $N_{сопр.ЛТр}$ — среднее количество сопровождаемых ложных траекторий в области обзора.

Таблица 2

С увеличением числа обзоров K увеличивается $P_{срыва}$, что обусловлено уменьшением

K	1	2	3	4	5
$P_{срыва}$	-	0.0056	0.012	0.022	0.032
$N_{сопр.ЛТр}$	10	4.98	2.51	1.27	0.65

совместной вероятности превышения статистикой отметки цели \bar{Z}_k порога H_{ex} во всех обзорах. Среднее количество сопровождаемых ложных траекторий $N_{сопр.ЛТр}$ с увеличением числа обзоров K снижается в результате уменьшения совместной вероятности попадания ложных отметок в стробы сопровождения во всех обзорах. Так, на пятом обзоре $N_{сопр.ЛТр}$ меньше, чем на первом приблизительно в 15 раз.

Выводы

В работе разработан алгоритм обнаружения цели в импульсно-доплеровской РЛС на основе многообзорного некогерентного накопления достаточной статистики, определяемой в каждом обзоре. Для уменьшения числа сопровождаемых траекторий применен двухэтапный метод накопления. Получены выражения для вероятности правильного обнаружения цели и ложной тревоги, в которых учитываются показатели качества сопровождения траектории. Для рассмотренного примера приведена методика вычисления выходного порога $H_{вых}^{теор}$, с которым сравнивается накопленная статистика. Увеличение числа обзоров, в которых выполняется накопление, приводит к значительному уменьшению вероятности ложной тревоги $F_{\Sigma_{експ}}$, что позволяет получить выигрыш в отношении сигнал/шум по сравнению с обнаружением в одном обзоре до 3.5 дБ.

Литература

1. Информационные технологии в радиотехнических системах : учеб. пособие для вузов / [Васин В. А., Власов И. Б., Егоров Ю. М. и др.]; под ред. И. Б. Федоров.— М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. — 671 с. — ISBN 5-7038-2263-7.

2. Johnston, L. A. Performance analysis of a dynamic programming track before detect algorithm / L. A. Johnston, V. Krishnamurthy // IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems.— 2002.— V.38.— № 1.— P. 228—242.

3. Кричигин А. В. Алгоритмы многообзорного обнаружения траектории движущейся цели / А. В. Кричигин, Е. А. Маврычев // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева.— 2010.— № 4.— С. 11—18.

4. Цифровая обработка сигналов в многофункциональных РЛС: часть 2 - алгоритмы обработки радиолокационных сигналов / Д. Ю. Бобров [и др.] // Цифровая обработка сигналов. — 2002. — №1. — С. 28—39.

5. Кузьмин С. З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. — М. : Радио и связь, 1986. — 352 с.

6. Вентцель Е. С. Теория вероятностей: Учебник для вузов. / Е. С. Вентцель.— [7-е изд.]. — М. : Высш. шк, 2001. — 575 с.

7. Сосулин Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учеб. пособие для вузов / Ю. Г. Сосулин. — М. : Радио и связь, 1992. — 304 с. — ISBN 5-256-01019-0.

References

1. Informatsionnyie tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemakh : ucheb. posobiie dlia vuzov / [Vasin V.A., Vlasov I.B., Ehorov Yu.M. i dr.]; pod red. I.B. Fedorov.— M.: Izd-vo MHTU im. N.E. Baumana, 2003.— 671 s. — ISBN 5-7038-2263-7.

2. Johnston, L.A. Performance analysis of a dynamic programming track before de-tect algorithm / L.A. Johnston, V.Krishnamurthy // IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems.— 2002.— V.38.— № 1.— P. 228–242.

3. Krichihin A.V. Alhoritmy mnohoobzornoho obnaruzheniia traiektorii dvizhushcheisia tseli / A.V. Krichihin, E.A. Mavrychev // Trudy NHTU im. R.E. Alekseieva.— 2010.— №4.— S. 11–18.

4. Tsifrovaia obrabotka sihnalov v mnohofunktsionalnykh RLS: chast 2 - alhoritmy obrabotki radiolokatsionnykh sihnalov / D. Yu. Bobrov [i dr.] // Tsifrovaia obrabotka sihnalov.— 2002.— №1.— С. 28-39.

5. Kuzmin S.Z. Osnovy proektirovaniia sistem tsifrovoi obrabotki radiolokatsionnoi informatsii / S. Z. Kuzmin.— M.: Radio i sviaz, 1986. — 352 s.

6. Venttsel E.S. Teoriia veroiatnostei: Uchebnik dlia vuzov / E.S. Venttsel. — [7-е изд.].— М.: Vyssh. shk, 2001. — 575 s.

7. Sosulin Yu.H. Teoreticheskiie osnovy radiolokatsii i radionavihatitsii: Ucheb. posobiie dlia vuzov / Yu.H. Sosulin. — М.: Radio i sviaz, 1992. — 304 s.— ISBN 5-256-01019-0.

Неуймін О. С., Жук С. Я. Виявлення цілі в імпульсно-доплерівській РЛС на основі багатооглядового накопичення сигналів. Задача виявлення рухомих цілей оглядовими радіолокаційними станціями, як правило, вирішується незалежно в кожному огляді, що не завжди ефективно при малих відношеннях сигнал/шум. Тому, важливе практичне значення має розробка алгоритмів виявлення цілі з накопиченням сигналів, отриманих за кілька оглядів. У статті на основі багатооглядового некогерентного накопичення сигналів розроблений двоетапний алгоритм виявлення траєкторії цілі в імпульсно-доплерівській РЛС. Аналіз отриманого алгоритму виконано на прикладі виявлення слабо маневруючої цілі за координатами дальності і радіальної швидкості за допомогою статистичного моделювання.

Ключові слова: виявлення цілі, імпульсно-доплерівська РЛС, супроводження до виявлення, накопичення сигналів.

Неуймин А. С., Жук С. Я. **Обнаружение цели в импульсно-доплеровской РЛС на основе многообзорного накопления сигналов.** Задача обнаружения движущихся целей обзорными радиолокационными станциями, как правило, решается независимо в каждом обзоре, что не всегда эффективно при малых отношениях сигнал/шум. Поэтому, важное практическое значение имеет разработка алгоритмов обнаружения цели с накоплением сигналов, полученных за несколько обзоров. В статье на основе многообзорного некогерентного накопления сигналов разработан двухэтапный алгоритм обнаружения траектории цели в импульсно-доплеровской РЛС. Анализ полученного алгоритма выполнен на примере обнаружения слабо маневрирующей цели по координатам дальности и радиальной скорости с помощью статистического моделирования.

Ключевые слова: обнаружение цели, импульсно-доплеровская РЛС, сопровождение до обнаружения, накопление сигналов.

Neuimin O., Zhuk S. **Target detection in pulse-Doppler radar based on multi-scanning signal integration.**

Introduction. Development of multi-scanning signal integration algorithms for pulse-Doppler radars which are widely used in practice is of great practical importance.

Problem statement. The problem of multi-scanning signal integration measuring range and range-rate is considered. The reflected signal from a target is a distorted white noise coherent packet of radio pulses with random initial phase and known amplitude. Target detection in a sequence of radar scans is reduced to the detection of target track.

Development of a two-step multi-scanning incoherent signal integration algorithm. Two-step integration method is applied to reduce the number of tracks. In the first stage the initial signals detection with a sufficiently high probability of false alarm is performed. In the second stage the tracking problem for selection target markers is solved and the multi-scanning signal integration is implemented. It provides an optimal target detection solution over K surveys with low signal-to-noise ratio. Expressions for the correct target detection probability and false alarm incorporating quality track tracking are obtained.

Simulation results. Analysis of the algorithm is carried out as example of the little maneuvering target detection using the statistical modeling. The methods of calculating the output threshold (the cumulative statistics are compared on it) is presented.

Conclusions. Increasing the number of scans (in which the integration are performed) leads to a significant decreasing the probability of false alarm, which allows to increase the signal-to-noise ratio compared with the detection in a single scan up to 3.5 dB.

Keywords: target detection, pulse-Doppler radar, track-before-detect, signal integration.