

Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ

УДК:621.396

В.Ф. Зюкин, Д.А. Гриб, А.Н. Колесник

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

ПРЕДЕЛЬНАЯ ДАЛЬНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ И ОПОЗНАВАНИЯ ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛИ ОБЗОРНОЙ РЛС ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Анализируется предельная дальность обнаружения (завязки трассы) движущейся цели, на которой она будет впервые обнаружена радиолокатором. Сопоставляются предельная и максимальная дальности обнаружения и опознавания. Для увеличения предельной дальности предлагается перейти к завязке трасс с использованием массивов «подпороговых» отметок.

Ключевые слова: обзорная РЛС, движущаяся цель, предельная дальность обнаружения.

Введение

Под РЛС военного назначения подразумевается первичный обзорный радиолокатор, сопряженный с работающим по его целеуказанию каналом системы активного запроса – ответа (наземным радиолокационным запросчиком – НРЗ). Целеуказание обеспечивает своевременный запрос и опознавание объектов (целей), обнаруженных радиолокатором.

Информационные возможности таких РЛС можно характеризовать максимальной дальностью обнаружения R_m воздушного объекта при фиксации высоты его полета (скорость полета не учитывается) при условных вероятностях правильного обнаружения D (примем $D=0,5$) и ложной тревоги на элемент разрешения F ($F=10^{-5}$). Аналогично можно определить максимальную дальность опознавания $R_{мо}$ объекта при автономной работе НРЗ в режиме кругового обзора.

Наряду с максимальной, в работе [1] рассматривается предельная дальность обнаружения $R_{пр}$ движущейся цели, на которой приближающаяся (с заданной скоростью) цель будет впервые обнаружена радиолокатором. В силу воздействия случайных факторов (помех, моментов «контакта» с целью, флуктуаций сигналов) предельная дальность обнаружения движущейся цели является случайной величиной, зависящей от параметров её движения. Поэтому целесообразно под $R_{пр}$ подразумевать, например, среднее значение предельной дальности обнаружения, для нахождения которого необходимо вычисление плотности распределения случайной величины.

Так как моменты включения запроса (по целеуказанию от радиолокатора) определяются предельной дальностью обнаружения цели $R_{пр}$, то от её величины будет зависеть и предельная дальность опознавания этой цели $R_{пр о}$. Значения $R_{пр}$ и $R_{пр о}$ опре-

деляют предельные границы зоны обнаружения и опознавания обнаруженных движущихся целей в конкретной воздушной обстановке, поэтому их следует отнести к важным характеристикам информационных возможностей РЛС.

Ниже вычисляются плотности вероятности и анализируются средние значения предельных дальностей обнаружения – $R_{пр}$ и опознавания – $R_{пр о}$, рассматриваются предельные дальности захвата трассы ($R_{пр зт}$) движущихся целей. Для увеличения предельной дальности $R_{пр зт}$ предлагается завязку трассы осуществлять с использованием массивов «подпороговых» отметок.

1. Статистические характеристики предельной дальности обнаружения

Для определения статистических характеристик предельной дальности обнаружения примем (как и в [1]), что РЛС производит периодический обзор пространства, а цель входит в зону обнаружения на изодальностном участке по радиальному маршруту с постоянной скоростью.

Текущее расстояние до цели r , при котором вероятность её обнаружения равна $D(r)$, уменьшается через обзор на величину Δr . Тогда вероятность первого обнаружения цели на дальности r – обозначим её через $\tilde{A}(r)$ – определяется вероятностью совмещения двух событий, заключающихся в том, что на дальности r произошло обнаружение, а на дальностях больших r обнаружения не было:

$$\tilde{A}(r) = D(r) \cdot \prod_{i=1}^n [1 - D(r + i \cdot \Delta r)] \quad (1)$$

(здесь n – число полных периодов обзора от начала полета до достижения целью дальности r).

Выражение (1) справедливо при независимости событий, определяющих правую часть равенства.

Обычно на практике такая независимость имеет место в силу независимости флюктуаций шумов и эхосигналов от обзора к обзору.

Расстояние r в (1) содержит случайную составляющую: начальную часть пути, которую проходит цель от начала движения до первого контакта с РЛС. После усреднения (1) по случайной составляющей в [1] получено следующее выражение для плотности распределения вероятности предельной дальности обнаружения движущихся целей:

$$W(r) = \ddot{A}(r) / \Delta r = [D(r) / \Delta r] \cdot \prod_{i=1}^n [1 - D(r + i \cdot \Delta r)]. \quad (2)$$

Плотность распределения вероятности предельной дальности опознавания $W_0(r)$ цели зависит от качества целеуказания (считаем его идеальным) и возможностей самого запросчика.

Обозначим зависимость вероятности получения информации опознавания от дальности через $G(r)$. Тогда вероятность опознавания движущейся цели на дальности r впервые – обозначим её через $D_0(r)$ – определим, подобно (1), вероятностью совмещения двух событий, заключающихся в том, что на дальности r произошло обнаружение и, после целеуказания каналу запроса, опознавание, а на дальностях больших r обнаружения и опознавания не было:

$$\ddot{A}_1(r) = D(r) G(r) \cdot \prod_{i=1}^n [1 - D(r + i \cdot \Delta r) G(r + i \cdot \Delta r)].$$

Окончательное выражение для плотности распределения вероятности предельной дальности опознавания $W_0(r)$ приведём к виду:

$$W_0(r) = [D(r) / \Delta r] G(r) \prod_{i=1}^n [1 - D(r + i \cdot \Delta r) G(r + i \cdot \Delta r)]. \quad (3)$$

На основе (2) и (3) могут быть получены необходимые статистические характеристики предельных дальностей обнаружения и опознавания. Для примера на рис. 1 представлены графические зависимости (от дальности r) плотностей вероятности (2) и (3), рассчитанные применительно к РЛС типа 36Д6.

Нижний график рис. 1 соответствует обнаружению скоростной приближающейся цели: при скорости $v=1000$ м/с и темпе обзора 10 с сокращение дальности $\Delta r=10$ км. Для среднескоростной цели: ($v=100$ м/с, верхний график рис. 1) величина $\Delta r=1$ км.

Зависимости $D(r)$ на рис. 1 (кривые в виде сплошных тонких линий) представлены в предположении релейского характера флюктуаций эхосигналов, когда [2]

$$D(r) = F^{1/(1+q^2(r))}, \quad (4)$$

где параметр обнаружения $q^2(r)=16(R_m/r)^4$.

Максимальная дальность обнаружения РЛС 36Д6 принята $R_m=150$ км (истребитель с ЭПР~1 м²). При $r=R_m$ параметр обнаружения $q^2(R_m)=16$ (12 дБ) и $D(R_m)=0,5$ при $F=10^{-5}$ (см. [2]), что соответствует характеристикам РЛС подобного типа.

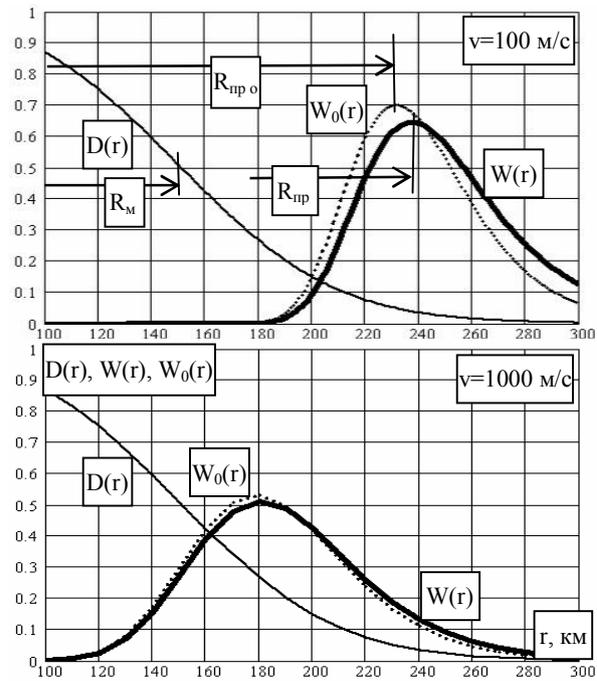


Рис. 1. Зависимость вероятности обнаружения $D(r)$, плотностей вероятности $W(r)$ и $W_0(r)$ от дальности r

Зависимость вероятности получения информации опознавания $G(r)$ от дальности (сигнал с известной амплитудой) задается функцией Маркума Q [2]:

$$G(r) = Q(q^2, \ln F^{-1}),$$

где параметр обнаружения $q^2=10(R_{mo}/r)^2$.

Максимальная дальность опознавания принята $R_{mo} = 2R_m = 300$ км, поэтому в точке $r = R_{mo}$ при $F = 10^{-5}$ вероятность опознавания $G(R_{mo}) \approx 0,5$ (см. [2]).

Плотности распределения вероятности $W(r)$ (2) и $W_0(r)$ (3) (кривые в виде сплошных толстых и пунктирных линий соответственно) представлены на рис. 1 в увеличенном (в 40 раз) вертикальном масштабе. Анализ этих зависимостей показывает, что кривые для всех плотностей вероятности имеют одномодовую, близкую к симметричной, колокольную форму, что позволяет в качестве среднего значения (матожидания) предельных дальностей выбрать наивероятное значение плотностей вероятности.

В итоге получаем: для скоростной цели $R_{пр} \approx R_{пр о} \approx 180$ км; для среднескоростной – $R_{пр} \approx 240$ км, $R_{пр о} \approx 230$ км (на рис. 1 эти дальности обозначены горизонтальными стрелками). Относительный разброс (или СКО) достигает 20%.

Результаты существенно отличаются от максимальной дальности обнаружения $R_m=150$ км. Очевидно, сопровождение скоростных целей более затруднено, так как из-за малого числа отметок предельная дальность их обнаружения существенно (на 60 км) меньше, чем целей со средней скоростью. При выбранных условиях предельные дальности обнаружения $R_{пр}$ и опознавания $R_{пр о}$ скоростных целей почти не отличаются, поэтому далее полагаем $R_{пр о} \approx R_{пр}$.

2. Предельная дальность захвата трассы

Обычно целеуказание канала опознавания формируется после захвата трассы цели. Типовая логика захвата трассы – $k/m=2/2$ или $2/3$. В отличие от [1], авторами получены несколько иные выражения для плотности распределения вероятности предельной дальности захвата трассы.

При логике $k/m=2/2$:

$$W_{2/2}(r)=(1/\Delta r)D_0D_1(1-D_2)Q_3, \quad (5)$$

где $Q_3=(1-D_3)Q_4+D_3(1-D_4)Q_5$ вычисляется рекуррентно при начальных условиях $Q_n=1, Q_{n-1}=1-D_nD_{n-1}$. Здесь $D_i=D(r+i\cdot\Delta r); Q_i=Q(r+i\Delta r)$.

При логике $k/m=2/3$:

$$W_{2/3}(r)=(1/\Delta r)D_0[D_1(1-D_2)(1-D_3)Q_4 + (1-D_1)D_2(1-D_3)(1-D_4)Q_5], \quad (6)$$

где $Q_i=D_i(1-D_{i+1})(1-D_{i+2})Q_{i+3}+(1-D_i)Q_{i+1}$ при $Q_n=1,$

$$Q_{n-1}=1-D_nD_{n-1},$$

$$Q_{n-2}=D_{n-2}(1-D_{n-1})(1-D_n)+(1-D_{n-2})(1-D_nD_{n-1}).$$

Результаты расчетов плотностей вероятности (5) и (6) для скоростной цели представлены на рис. 2 (штриховые линии). Кривые значительно сместились относительно $W(r)$ влево: предельная дальность захвата трассы $R_{\text{рпзт}}$ меньше предельной дальности обнаружения $R_{\text{рп}}$ на 35 – 45 км, т.е. относительные потери в дальности достигают 20...25%.

Для уменьшения этих потерь предлагается захват трассы скоростных целей осуществлять с использованием, помимо обычных отметок, массива «подпороговых» отметок. Последние формируются при пониженном пороге обнаружения (которому соответствует более высокий уровень ложных тревог $F_1>F$) и хранятся в течение нескольких обзоров [3]. При обнаружении первой (обычной) отметки в её окрестности ищутся подпороговые отметки, которые могли сформироваться в ходе предыдущих

обзоров. Завязку трассы (также по логике k/m) при этом можно осуществить раньше, что и позволяет увеличить предельную дальность её захвата.

Для $k/m=2/2$ результат расчета плотности вероятности предельной дальности захвата трассы при подпороговой обработке имеет вид

$$W_{2/2п}(r) = (1/\Delta r)D_0[D_1(1-P_2)Q_3+(P_1-D_1)Q_2], \quad (7)$$

где $Q_i = D_i(1-P_{i+1})Q_{i+2} + (1-D_i)Q_{i+1}$ при $Q_n=1, Q_{n-1}=1 - P_nD_{n-1}$.

Здесь $P_i=P(r+i\cdot\Delta r)$ – вероятность обнаружения (формирования) подпороговой отметки цели на соответствующей дальности (при уровне ложных тревог F_1). По аналогии с (4)

$$P(r) = (F_1)^{\frac{1}{1+q^2(r)}}. \quad (8)$$

Для $k/m=2/3$

$$W_{2/3п}(r)=(1/\Delta r)D_0\{D_1(1-P_2)(1-P_3)Q_4+(P_1-D_1)[D_2(1-P_3)(1-P_4)Q_5 + (P_2-D_2)Q_3+(1-P_2)Q_3] + (1-P_1)[D_2(1-P_3)(1-P_4)Q_5 + (P_2-D_2)Q_3]\}, \quad (9)$$

где $Q_i=D_i(1-P_{i+1})(1-P_{i+2})Q_{i+3}+(1-D_i)[D_{i+1}(1-P_{i+2})(1-P_{i+3})Q_{i+4}+(P_{i+1}-D_{i+1})Q_{i+2}+(1-P_{i+1})Q_{i+2}+(1-P_i)[D_{i+1}(1-P_{i+2})(1-P_{i+3})Q_{i+4}+(P_{i+1}-D_{i+1})Q_{i+2}+(1-P_{i+1})Q_{i+2}]$

при $Q_n = 1, Q_{n-1} = 1 - P_nD_{n-1},$

$$Q_{n-2} = 1 - D_{n-2}D_{n-1} - (1 - D_{n-2})D_{n-1}P_n.$$

Эффективность канала подпороговой обработки оценим путем анализа плотностей вероятности (7) и (9), для чего необходимо определить (8), т.е. задаться уровнем ложных тревог F_1 .

Пусть при обычной обработке стробы первичного захвата трассы, описанные возле очередной неотожествленной отметки, имеют форму круга 1 и 2 (рис. 3) с числом элементов разрешения M (обычно $M\sim 10^2\dots 10^3$) и N соответственно. Вероятность завязки ложной трассы (логика $k/m=2/3$) можно записать в виде [4]:

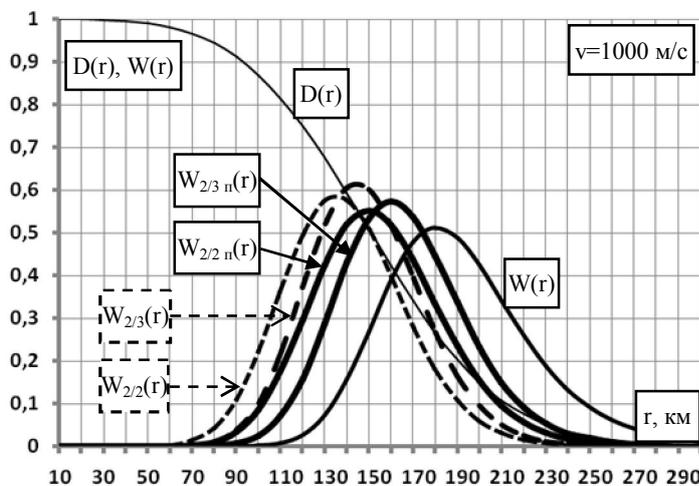


Рис. 2. Зависимость вероятности $D(r)$, плотностей вероятности $W_{2/2}(r), W_{2/3}(r), W_{2/2п}(r), W_{2/3п}(r)$ от дальности r для скоростной приближающейся цели

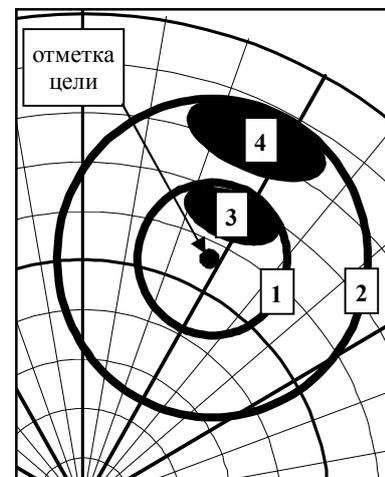


Рис. 3. Форма стробов при обычной (стробы 1 и 2) и подпороговой (стробы 3 и 4) обработке

$$F_{2/3} = F \{ [1 - (1 - F)^M] + [1 - (1 - F)^N] \} \approx 5MF^2, \quad (10)$$

где в фигурных скобках определена вероятность попадания в строб 1 (или 2) хотя бы одной ложной отметки во втором (или в третьем) обзоре (после обнаружения неотожествленной отметки). Также принято, что $N \approx 4M$; $NF = 4MF \ll 1$.

При логике $k/m=2/2$ используется лишь строб 1, поэтому

$$F_{2/2} = F[1 - (1 - F)^M] \approx MF^2. \quad (11)$$

Допустим, параллельно обычному включен предлагаемый канал, рассчитанный на обнаружение трасс скоростных приближающихся целей с использованием подпороговых отметок. Эти отметки выбираются из массивов, соответствующих предыдущим обзорам, путем стробирования. Форма стробов 3 и 4 (с числом элементов разрешения S ($S \ll M$) и $T \approx 4S$ соответственно – рис. 3) определяет диапазон скоростей и ракурсов движения целей, трассы которых желательно обнаружить. Вероятность завязки ложных трасс при такой подпороговой обработке (логика $k/m = 2/3$)

$$F_{2/3 \text{ п}} = vF \{ [1 - (1 - F_1)^S] + [1 - (1 - F_1)^T] \} \approx 5vSFF_1, \quad (12)$$

где в фигурных скобках определена вероятность попадания в строб 3 (или 4) хотя бы одной ложной подпороговой отметки из массива отметок, сформированных в ходе предыдущих обзоров (до обнаружения обычной неотожествленной отметки). Также принято, что канал используется в части зоны обзора, доля которой равна $v \leq 1$.

При логике $k/m=2/2$ соответственно

$$F_{2/2 \text{ п}} = vF[1 - (1 - F_1)^S] \approx vSFF_1. \quad (13)$$

Если потребовать, чтобы интенсивности потоков ложных трасс обычного и предлагаемого (параллельно действующего) каналов не отличались, то, после приравнивания (10) и (12), а также (11) и (13), определим допустимый уровень ложных тревог F_1 :

$$F_1 \leq MF/vS. \quad (14)$$

При $M/S=10$ и $v=0,1$ подпороговый уровень $F_1=10^{-3}$. Для этих условий на рис. 2 построены кривые плотностей вероятности (7) и (9) (толстые линии). Видно, что применение подпороговой обра-

ботки позволило существенно (в ~ 2 раза) снизить относительные потери в предельной дальности захвата трассы $R_{\text{пр зт}}$, т.е. дальность завязки трассы возрастает на 10...15%. Платой за успех является увеличенный (в 2 раза) поток ложных трасс.

Выводы

1. Рассмотрены предложения по анализу пространственных информационных характеристик обзорных РЛС с учетом скорости движения целей.

2. Предложены и исследованы новые методы подпороговой обработки, внедрение которых позволит существенно – на 10...15% – увеличить предельные дальности захвата трасс скоростных приближающихся целей, улучшить другие информационные показатели РЛС. Формирование и хранение при этом массивов подпороговых отметок потребует незначительного увеличения общего ресурса вычислительных средств.

Предложенные методы обработки особенно полезны в РЛС малых высот, где из-за малого числа отметок скоростная приближающаяся цель вообще может быть не обнаружена.

Список литературы

1. Зачепицкий А.А. К вопросу о предельной дальности обнаружения радаром движущейся цели [Электронный ресурс] / А.А. Зачепицкий. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.softaero.ru/html/otobrl.html>.
2. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теории. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, А.С. Маляренко и др.; под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
3. Литвинов В.В. Радиолокаторы систем контроля воздушного пространства: ретроспектива и современные проблемы интеграции и унификации / В.В. Литвинов // Прикладная радиоэлектроника. – 2004. – Т. 3, № 4. – С. 61-74.
4. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Сов. радио, 1974. – 432 с.

Поступила в редколлегию 28.09.2011

Рецензент: д-р техн. наук проф. В.В. Литвинов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ГРАНИЧНА ДАЛЬНОСТЬ ВИЯВЛЕННЯ І ВПІЗНАВАННЯ РУХОМОЇ ЦІЛІ ОГЛЯДОВОЮ РЛС ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

В.Ф. Зюкін, Д.А. Грїб, О.М. Колеснік

Аналізується гранична дальність виявлення (зав'язки траси) рухомої цілі, на якій вона буде вперше виявлена радіолокатором. Зіставляються гранична і максимальна дальності виявлення і впізнання. Для збільшення граничної дальності пропонується перейти до зав'язки трас з використанням масивів «підпорогових» відміток.

Ключові слова: оглядова РЛС, рухома ціль, гранична дальність виявлення.

MAXIMUM DISTANCE OF DISCOVERY AND IDENTIFICATION OF MOVING-TARGET SURVEY RADAR OF MILITARY-ORIENTED

V.F. Zyukin, D.A. Grib, A.N. Kolesnik

Maximum distance of finding (plots of route) out a moving-target on which will be first found out it radar is analyzed. Maximum and maximal distances of discovery and identification are compared. For the increase of maximum distance it is suggested to pass to the plot of routes with the use of arrays of «auxiliary» marks.

Keywords: survey radar, moving-target, maximum distance of discovery.