

УДК 621.396

В.Ф. Зюкин, Д.А. Гриб, А.А. Гризо

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПО СЕЛЕКЦИИ В ОБЗОРНЫХ РЛС ТРАСС ЦЕЛЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ ДИСКРЕТНЫХ (ЦЕЛЕПОДОБНЫХ) МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ

Оцениваются возможности по автоматическому обнаружению в обзорных РЛС трасс маловысотных целей при наличии целеподобных мешающих отметок. Синтезируется новый алгоритм обнаружения трасс целей в условиях помех, анализируются показатели его эффективности и их зависимость от особенностей радиолокационной разведки воздушного пространства.

обзорные РЛС, помеха, трасса цели, эффективность радиолокационной разведки

Введение

Постановка задачи и анализ литературы. В современных РЛС одним из результатов обработки радиолокационной информации в очередном цикле обзора воздушного пространства являются сформированные (и отображаемые на индикаторах) координатные точки автомата (КТА), присвоенные неотожествленным обнаруженным отметкам целей и некомпенсированным отметкам помех (ложным отметкам). Число последних в зоне обзора может достигать нескольких тысяч (целеподобные отметки типа "ангел-эхо", неполностью скомпенсированные остатки отражений от местных предметов и облаков, диполей, внутрисистемные помехи, активные помехи со стороны противника). Наиболее сложна в этих условиях завязка трасс маловысотных целей, время пребывания которых в зоне обнаружения незначительно (несколько засечек трассы), а наблюдение затруднено из-за маскирующего действия отражений электромагнитной энергии от объектов различного происхождения.

Снижение числа ложных отметок (и, соответственно, КТА) часто достигается завышением амплитудных [1], скоростных [2] порогов селекции сигналов на этапе внутриобзорной обработки, что может привести к потерям отметок малозаметных, малоскоростных и маловысотных целей. Необходимо сбалансированное распределение усилий по подавлению ложных сигналов на разных этапах обработки (внутри- и межпериодной, внутри- и межобзорной), для чего необходимы оценки возможностей селекции полезных сигналов (информации) на фоне помех на каждом этапе. В статье оцениваются потенциальные возможности по автоматическому выявлению информации о трассах целей на основе анализа распределения КТА от истинных и ложных отметок в процессе многообзорной обработки радиолокационной информации.

Постановка задачи. Задачу автоматического обнаружения трассы цели можно сформулировать как выявление (в ряде смежных обзоров) последовательности точечных отметок в зоне обзора S_0 , с за-

кономерным изменением координат, на фоне таких же (но ложных) отметок, случайно появляющихся в этой зоне. Аналогичным образом решает задачу выявления целей человек-оператор, наблюдая на обзорном индикаторе с послесвечением воздушную обстановку за несколько периодов обзора РЛС (привлекая при этом, по возможности, сигнальную или иную информацию).

Признаком наличия трассы цели может считаться обнаружение, среди множества КТА, характерного пространственного (многообзорного) "точечного портрета", вид и алгоритмы селекции которого зависят от статистического описания распределения КТА в области помех (ложных отметок), а также в области действия смеси полезного сигнала и помех (истинных и ложных отметок).

Цель работы – синтез и анализ эффективности алгоритмов обнаружения трасс целей, обеспечивающих фильтрацию ложной информации на этапе межобзорной обработки.

Основная часть

1. Статистические характеристики распределения КТА в пространстве. При определении условных плотностей вероятности распределения КТА в пространстве воспользуемся полиномиальной моделью движения воздушного объекта (цели), при которой координата x (или y) изменяется во времени по закону [3]

$$x(t) = x_0 + x'_0(t - t_0) + x''_0(t - t_0)^2/2! + \dots \quad (1)$$

Измеренные значения координаты в моменты t_k

$$x_{ik}(t_k) = x_{ik} = x_k + \Delta_{xk},$$

где $x_k = x(t_k)$; Δ_{xk} – ошибка k -го измерения.

Ошибки измерения по независимым наблюдаемым координатам цели независимы между собой. Полагая их распределенными по нормальному закону с нулевым средним, запишем плотность вероятности для значения x_{ik} в виде

$$W_{ik}(\Delta_{xk}) = (2\pi)^{-0.5} (\sigma_{xk})^{-1} \exp[-(x_{ik} - x_k)^2/2\sigma_{xk}^2], \quad (2)$$

где σ_{xk}^2 – дисперсия k -го отсчета координаты цели.

При измерении двух плоскостных (x, y) координат ошибки Δ_{xk}, Δ_{yk} могут быть коррелированными.

Если направления осей системы координат и эллипса равной вероятности совпадают, то двухмерная плотность распределения системы случайных величин Δ_{xk}, Δ_{yk} представляется в виде произведения

$$W_{\Pi}(\Delta_{xk}, \Delta_{yk}) = W_{\Pi}(\Delta_{xk}) W_{\Pi}(\Delta_{yk}) = (2\pi)^{-1} (\sigma_{xk}\sigma_{yk})^{-1} \exp(-\lambda_k^2/2), \quad (3)$$

где

$$\lambda_k^2 = (\Delta_{xk}^2/\sigma_{xk}^2 + \Delta_{yk}^2/\sigma_{yk}^2) - \quad (3a)$$

эллиптическое отклонение (при $\lambda_k^2 = 1$ имеем единичный эллипс); $\sigma_{x(y)k}$ – величины сопряженных полуосей эллипса ошибок.

КТА, соответствующие отметкам помех, возникают случайно и независимо друг от друга, образуя, при регулярном обзоре по координатам, поток ложных отметок (точек). При стационарном и ординарном потоке число ложных отметок q , попадающих в выбранную область S , распределяется по закону Пуассона:

$$P_q = (q!)^{-1} (SM_0/S_0)^q \exp(-SM_0/S_0), \quad (4)$$

где M_0 – среднее число ложных отметок в зоне обзора РЛС; $S_0 = XY$ – размеры зоны обзора двухкоординатной РЛС, имеющей протяженность X, Y по координатам x, y соответственно.

Отношение M_0/S_0 характеризует плотность потока ложных отметок.

Далее область S в преобразованной, аналогично (3), системе координат будем представлять в виде эллиптического строба, подобного эллипсу ошибок (3a): ориентация сопряженных полуосей совпадает, а размеры полуосей пропорциональны (с коэффициентом R) величинам сопряженных полуосей эллипса ошибок $\sigma_{x(y)}$ и нормированы к ним.

Площадь такого нормированного эллипса $S = \pi R \sigma_x R \sigma_y / \sigma_x \sigma_y = \pi R^2$, т.е. безразмерный коэффициент R имеет смысл эквивалентного радиуса нормированного строба и связан с его размером (площадью) соотношением $R = (S/\pi)^{0.5}$.

Для сохранения размерности также должны быть нормированы и координаты области S_0 , что позволяет в преобразованной системе координат считать величины S и S_0 безразмерными.

2. Варианты обнаружителей трасс целей.

Для дальнейшего анализа выберем две модели обнаружителей.

2.1. Указанные распределения в пространстве отметок целей (1), (3), помех (4) и соответствующих им КТА приводят к первой модели обнаружителя трасс в виде **обычного [3] пространственного фильтра**. Он включает последовательно формируемые стробы S , с помощью которых определяется степень соответствия через обзорное изменение координат КТА закону движения цели (1) с учетом распределения ошибок измерений (3).

Неизвестные координаты и параметры движения (1) $x_0, y_0, x'_0(t - t_0), \dots$ оцениваются в процессе фильтрации. Размер и форма стробов S должны гарантировать попадание в него отметок цели при минимальном числе ложных отметок (4).

При такой пространственной фильтрации к элементам трассы относят те отметки из попавших в строб, которые имеют минимальное эллиптическое отклонение от ожидаемых точек трассы (центров стробов). Попадание в стробы определенного числа отметок помех приводит к появлению ложных трасс.

В [3] предложена релеевская плотность вероятности для случайного эллиптического (нормированного) отклонения отметки цели (в k -ом отсчете) от центра строба:

$$W_{\Pi}(\lambda_k) = \lambda_k \exp(-\lambda_k^2/2). \quad (5)$$

Случайное эллиптическое отклонение ближайшей к центру строба ложной отметки, с учетом (4), также может быть описано законом Релея:

$$W_{\Pi}(\lambda_k) = (\lambda_k/a_n^2) \exp(-\lambda_k^2/2a_n^2), \quad (6)$$

где $a_n^2 = S_0/(2\pi M_0)$ – безразмерный параметр плотности вероятности.

Соотношения (5) и (6) используются для синтеза и расчета показателей качества обнаружителя трасс при невысокой плотности ложных отметок, когда для пространства помех справедливо распределение (6), а в области совместного наличия отметок помех и цели плотность распределения (5) изменяется незначительно.

2.2. Синтез второй модели обнаружителя трасс выполним в предположении высокой плотности M_0/S_0 ложных отметок. Для нахождения оптимальной структуры обнаружителя на основе отношения правдоподобия необходимо определить, вместо $W_{\Pi}(\lambda_k)$ (5), совместную плотность распределения вероятности $W_{\Pi\Pi}(\lambda_k)$ случайного эллиптического отклонения от центра строба ближайшей отметки цели или помехи из тех отметок, что появляются в области наличия цели.

Из сопоставления (5) и (6) следует, что при $a_n^2 = 1$ плотность распределения отклонений ближайших ложных отметок от ожидаемых точек трассы не отличается от соответствующей плотности для отметок цели:

$$W_{\Pi}(\lambda_k) = W_{\Pi}(\lambda_k/a_n^2 = 1) = W_{\Pi}(\lambda_k/M_{\Pi}), \quad (7)$$

где $M_{\Pi} = S_0/(2\pi)$ (из условия $a_n^2 = 1$) – среднее эквивалентное (гипотетическое) число распределенных по закону Пуассона ложных отметок в зоне обзора, при котором равенство справедливо. Иначе, при плотности потока ложных отметок, равной M_0/S_0 , их статистическое воздействие на процедуры обнаружения трасс не отличается от воздействия отметок цели (5).

Приведенные рассуждения (в предположении, что потоки отметок пуассоновские, т.е. суммирование потоков не меняет их закон распределения) позволяют описать совместную условную плотность распределения отклонений ближайших отметок в области цели и помехи в виде

$$W_{\Pi\Pi}(\lambda_k) = W_{\Pi}(\lambda_k/M_{\Sigma}) = (\lambda_k/a_{\Sigma}^2) \exp(-\lambda_k^2/2a_{\Sigma}^2), \quad (8)$$

где $M_{\Sigma} = M_0 + M_{\Pi} = M_0 + S_0/(2\pi)$,
а $a_{\Sigma}^2 = S_0/(2\pi M_{\Sigma}) = S_0/(2\pi M_0 + S_0)$.

В итоге, при отсутствии корреляции отклонений $\Delta_{x(y)k}$ для различных моментов времени $t_k, k=1, \dots, m$,

совместные условные плотности вероятности

$$W_{\text{ин}(n)}(\lambda_1, \dots, \lambda_m) = \prod_{k=1}^m W_{\text{ин}(n)}(\lambda_k). \quad (9)$$

Модель оптимального обнаружителя трасс целей может быть получена (при наличии выборки КТА за m обзоров) на основе логарифма отношения правдоподобия с использованием условных плотностей вероятности $W_{\text{ин}}(\cdot)$ и $W_{\text{п}}(\cdot)$ (9). С учетом (5) – (9) алгоритм обнаружения может быть реализован в виде

$$\begin{aligned} \ln [W_{\text{ин}}(\cdot)/W_{\text{п}}(\cdot)] = \\ = m \ln[1 + S_o/(2\pi M_o)] - \sum_{k=1}^m \lambda_k^2 \geq C_1 \end{aligned}$$

(оценки координат целей считаются равнозначными: $\sigma_{x(y)k}^2 = \sigma_{x(y)}^2$; порог C_1 определяет условные вероятности правильного (Д) и ложного (Ф) обнаружения трассы).

В общем случае, во второй модели при селекции трасс целей необходимо отбирать те отметки, для которых сумма квадратов их эллиптических отклонений от ожидаемой трассы Q минимальна:

$$Q = \sum_{k=1}^m \lambda_k^2 \leq C. \quad (10)$$

Отбор отметок (или КТА) в таком **синтезированном пространственном фильтре** можно осуществлять поэтапно. Сначала отфильтровать "трассоподобные" группы КТА набором "грубых" пространственных (черезобзорных) стробов.

На втором этапе для каждой i -ой комбинации отобранных отметок вычисляется квадратичная форма Q_i . Так как характеристики обнаруживаемой трассы заранее неизвестны, то расчет Q_i (расчет эллипсоидальных отклонений λ_k^2) предполагает и максимально правдоподобную оценку параметров движения цели. В качестве функции правдоподобия используется m -мерная условная плотность распределения вероятностей (3), рассматриваемая как функция параметров трассы (1). Размер обрабатываемой выборки небольшой ($m = 3...6$), вероятность маневра целей на этом интервале, особенно высокоскоростных, невелика, поэтому степень полинома (1) не выше двух.

На третьем этапе форма с минимальным значением $Q_{\text{мин}}$ сравнивается с порогом C и, при выполнении условия (10), принимается решение о наличии трассы и значениях ее параметров.

3. Расчет показателей качества предложенных обнаружителей трасс целей. К основным показателям качества отнесем условные вероятности правильного обнаружения трассы цели D и ложной тревоги в виде обнаружения ложных трасс Φ , среднее число $M_{\text{пт}}$ и время "жизни" $t_{\text{ср}}$ ложных трасс.

3.1. В обнаружителе первой модели уровни D_1 и Φ_1 можно регулировать объемом анализируемой выборки m , размерами стробов S (далее полагаем радиусы R всех стробов одинаковыми), видом логики обнаружения k/m (для упрощения расчетов выбираем логику m/m , т.е. вероятностью попада-

ния отметок цели пренебрегаем). При этом значение Φ_1 (цель отсутствует) определяется вероятностью попадания в каждый из m очередных стробов S хотя бы одной ложной отметки. С учетом (4) условная вероятность ложной тревоги на выходе обнаружителя первой модели

$$\Phi_1 = (1 - P_0)^m = [1 - \exp(-SM_o/S_o)]^m, \quad (11)$$

где P_0 – вероятность отсутствия в стробе S ложных отметок.

Условная вероятность D_1 (стробы S в области наличия отметок цели и помех) определяет возможность попадания в каждый из m очередных стробов очередной отметки цели или хотя бы одной ложной отметки.

При описании случайного эллиптического отклонения отметок цели от центра стробов S (с радиусом $R = (S/\pi)^{0.5}$) распределением (5) КТА цели не попадет в строб с вероятностью

$$\begin{aligned} P_{\text{п0}} = \int_R^\infty W_{\text{п}}(\lambda_k) d\lambda_k = \int_R^\infty \lambda_k \exp(-\lambda_k^2/2) d\lambda_k = \\ = \exp(-S/2\pi). \end{aligned} \quad (12)$$

Отсутствие истинных и ложных отметок в стробе, размещенном в области сигнал+помеха, определится вероятностью $P_{\text{п0}}P_0$, поэтому условная вероятность правильного обнаружения трассы цели

$$D_1 = (1 - P_{\text{п0}}P_0)^m = [1 - \exp(-S/2\pi - SM_o/S_o)]^m. \quad (13)$$

Выражения (11) и (13) можно объединить:

$$D_1 = \{1 - \exp[\ln(1 - \Phi_1^{1/m})(1 + S_o/2\pi M_o)]\}^m. \quad (14)$$

3.2. В синтезированном обнаружителе (обнаружителе второй модели) уровни D_2 и Φ_2 можно регулировать объемом выборки m и величиной порога C (10).

Эллиптические отклонения ближайшей к центру строба отметки λ_k распределены по закону Релея (6) – в области помехи, и (8) – в области цели и помехи. Поэтому λ_k^2 имеют одностороннее экспоненциальное распределение, а их сумма в квадратичной форме Q (10) распределена по закону Эрланга:

$$W(Q) = \beta^m Q^{m-1} \exp(-\beta Q)/(m-1)!, \quad (15)$$

где $\beta = \beta_1 = (2\pi M_o)/S_o$ в области отметок помех и $\beta = \beta_2 = (2\pi M_o + S_o)/S_o$ в области отметок цели и помех.

Вероятность выполнения условия (10) с учетом (15) в области ложных отметок определяет уровень ложных тревог Φ_2 , а в области отметок цели и помех – надежность правильного выявления трассы цели D_2 . Выполняя интегрирование (15) в пределах от нуля до величины C , найдем:

$$\begin{aligned} \Phi_2 = \Phi_2(C) = \\ = 1 - \exp[-C(2\pi M_o)/S_o] \sum_{k=0}^{m-1} [C(2\pi M_o)/S_o]^k/k!; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} D_2 = 1 - \exp[-C(2\pi M_o + S_o)/S_o] \times \\ \times \sum_{k=0}^{m-1} [C(2\pi M_o + S_o)/S_o]^k/k!. \end{aligned} \quad (17)$$

Объединяя (16) и (17), окончательно получим:

$$D_2 = 1 - \exp[-\arg(\Phi_2)(2\pi M_0 + S_0)/S_0] \times \sum_{k=0}^{m-1} [\arg(\Phi_2)(2\pi M_0 + S_0)/S_0]^k / k!, \quad (18)$$

где $\arg(\Phi_2)$ – аргумент функции (16) Φ_2 (значение порога С).

4. Обсуждение полученных результатов.

4.1. Из сопоставления показателей качества (14) и (18) следует, что возможности обычного и синтезированного пространственных фильтров трасс целей зависят лишь от плотности потока ложных отметок M_0/S_0 и объема выборки m .

Величина (площадь) S_0 нормирована к площади эллипса ошибок (3а), которую (с учетом потенциальных, инструментальных ошибок и ошибок экстраполяции) примем равной площади элемента разрешения РЛС. Для типовой РЛС обнаружения маловысотных целей число элементов разрешения по дальности и по азимуту близко к 100. Поэтому считаем общее число элементов разрешения $S_0 = 100 \times 100 = 10^4$, число ложных отметок $M_0 < (1 \dots 3)10^3$; при этом величина M_0/S_0 , как параметр расчетных формул (14) и (18), представляет отношение числа ложных отметок в зоне обзора к числу элементов разрешения РЛС и изменяется в пределах от 0 до 0,1...0,3.

4.2. На рис. 1 представлен вариант расчета зависимости показателей качества D_1 (14), D_2 (18) от плотности потока ложных отметок M_0/S_0 при разном числе итераций $m = 4$ и $m = 6$. Обнаружитель первой модели перегружается (считаем, что факт перегрузки соответствует $D_1 = D_2 \leq 0,9$) при $M_0/S_0 > 0,009 \dots 0,016$. Таким образом, допустимое максимальное число ложных отметок в зоне обнаружения $M_{0\max} \leq 90$ при числе итераций $m = 4$, или $M_{0\max} \leq 160$ при условии, что задержка в выдаче информации возрастет до $m = 6$ обзоров.

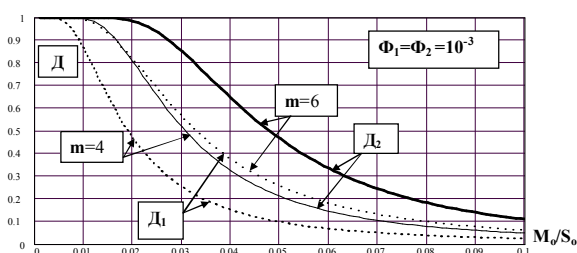


Рис. 1. Зависимость условных вероятностей D_1 и D_2 (пунктирные и сплошные линии)

от интенсивности потока ложных отметок M_0/S_0 при уровне ложных трасс $\Phi_1 = \Phi_2 = 10^{-3}$ и объемах выборки $m = 4; 6$

Обнаружитель второй модели, синтезированный для работы в условиях плотных потоков ложных отметок, имеет более высокую помехоустойчивость: $M_{0\max} \leq 160 \dots 270$. Он превосходит обнаружитель первой модели по помехоустойчивости в 1,5...2 раза, причем во всех ситуациях. Однако задержка в выдаче информации также велика.

Указанные результаты имеют место при уровне ложных тревог $\Phi_1 = \Phi_2 = 10^{-3}$, что будет приводить (в критических помеховых ситуациях) к появлению до $M_{лт} \sim 10$ ложных трасс в каждом обзоре со временем "жизни" $t_{cp} \sim 6 \dots 8$ обзоров.

Ужесточение уровня ложных тревог на порядок приведет к $M_{лт} \sim 1$, но допустимое максимальное число ложных отметок $M_{0\max}$ снижается примерно в 1,5 раза для обоих обнаружителей ($M_{0\max} < 60 \dots 180$).

Выводы

Рекомендациями по повышению помехоустойчивости обнаружителей трасс могут быть:

а) повышение точности локационных измерений координат (уменьшение площади эллипса ошибок на порядок во столько же раз увеличивает помехоустойчивость обнаружителей, что следует из (14) и (18));

б) измерение трех координат целей, в результате чего увеличивается число элементов разрешения, а значит, пропорционально снижается плотность потока ложных отметок;

в) повышение темпа обзора пространства, что позволяет увеличивать объем анализируемой выборки m при допустимом времени задержки в выдаче информации о трассах (попутно также возможен выигрыш в помехоустойчивости за счет снижения величины динамических ошибок экстраполяции);

г) учет в алгоритмах обработки сигнальной информации (сведения об уровне эхо-сигнала, частоте Доплера, характере модуляции /4/ и т. д.), прочих априорных сведений о целях, параметрах зоны обзора и помеховой обстановке, что позволит сокращать объем ложной информации на всех этапах ее анализа.

Список литературы

1. Зюкин В.Ф., Колесник О.М. Влияние ограниченного динамического диапазона приемного тракта РЛС на эффективность амплитудной селекции эхо-сигналов целей на фоне дискретных мешающих отражений типа «ангел-эхо» // 36. науч. праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 1998. – Вип. 16. – С. 78-86.
2. Зюкин В.Ф., Гризо А.А., Адамович О.О. Обнаружение сигнала на фоне нескомпенсированных остатков пассивных помех // 36. науч. праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 2000. – № 2 (28). – С. 17-22.
3. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Сов. радио, 1974. – 432 с.
4. Зюкин В.Ф., Филимонов Н. П. Возможности селекции точечных отражений на основе корреляционно-спектрального анализа сигналов, отраженных от них // Вопросы совершенствования автоматизированных систем управления. – Х.: ВИРТА ПВО, 1984. – С. 168-172.

Поступила в редколлегию 20.12.2006

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