

ОБНАРУЖЕНИЕ НЕИЗВЕСТНОГО ЧИСЛА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ВИРТУАЛЬНОЙ ТАБУЛЯЦИИ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ПРАВДОПОДОБИЯ

к.т.н. В.Е. Саваневич

(представил д.т.н., проф. Д.В. Голкин)

Предложен метод обнаружения неизвестного числа близких малоразмерных объектов, позволяющий накопить потенциалы, пропорциональные энергии сигналов вдоль траекторий объектов, не отслеживая их изменяющихся во времени координат. Метод не использует операции декорреляции статистик всех возможных траекторий. За счет этого показатели качества метода практически соответствуют показателям качества независимого обнаружения одиночных объектов.

Введение. Насущной проблемой современной теории вторичной обработки локационной информации является проблема обнаружения и первоначального определения параметров движения близких объектов. Решение подобных задач мотивировано, например, выводением одной ракетой – носителем до 13 малогабаритных спутников и необходимостью оперативного контроля процесса их разведения. При этом задачу сопровождения близких объектов можно считать решенной [1 – 4].

Анализ публикаций. При обнаружении неизвестного числа близких малоразмерных движущихся объектов стробовый метод, основанный на логическом накоплении, не трудоспособен [1]. Предельно высокая трудоемкость метода перебора гипотез о сочетании отметок с учетом их пропусков и наличия ложных не позволяет надеяться и на его реализацию [5]. Известен метод [6] обнаружения движущегося объекта, основанный на табуляции одноцелевой функции правдоподобия с использованием технологии Хока. Данный метод позволяет накопить потенциалы, пропорциональные энергии сигналов вдоль траекторий объектов, не отслеживая изменяющихся во времени координат объектов. Выражение для многоцелевой функции правдоподобия также известно [2, 3]. Для реализации указанного метода табуляции в многоцелевом случае необходимо ввести M^Q накопителей, каждый из которых ответственен за определенное сочетание параметров движения Q объектов при условии, что всего существует M возможных траекторий одного объекта. Причем совокупность M гипотетических траекторий названа дискретной моделью пространства параметров одной траектории (ДМППТ), а совокупность вариантов возможных сочетаний парамет-

ров Q таких траекторий удобно назвать ДМППТ Q объектов (ДМППТ Q). В работе [7] предложен метод обнаружения неизвестного числа объектов, который можно свести к оценке весов гипотетических траекторий методом наименьших квадратов (МНК). Для реализации данного метод достаточно использовать дискретную модель пространства параметров одной траектории. Платой за данное упрощение являются энергетические потери, вызванные проведением декоррелирующего преобразования [8].

Целью статьи является введение метода обнаружения неизвестного числа близких малогабаритных объектов, основанного на виртуальной табуляции многоцелевой функции правдоподобия.

Постановка задачи. Число объектов в ЗО Q не может быть больше Q_{\max} , не известно и подлежит оценке. Каждый объект движется по одной из M ($Q \ll M$) возможных траекторий. Объекты движутся по разным траекториям. Зона обзора наблюдательного средства состоит из V ЭОР и в этом смысле – дискретна. Каждый ЭОР на каждом из T обзоров характеризуется значением квадрата амплитуды A_{it}^2 . Совокупность A_{it}^2 для $i = \overline{1, V}$, $t = \overline{1, T}$ представляют собой матрицу-столбец (V ЭОР на T обзорах получили сквозную нумерацию $n = \overline{1, TV}$):

$$A^T = (A_{11}^2, A_{21}^2, \dots, A_{i1}^2, \dots, A_{TV}^2) = (A_1^2, A_2^2, \dots, A_n^2, \dots, A_{TV}^2)$$

Матрица-столбец A является единственным результатом наблюдений, проведенных на T обзорах. Объект, движущийся по m -й траектории, имеет вес $e_m = q_m^2$ (отношение сигнал/шум по мощности), постоянный на протяжении T обзоров (ограничение $q_t = q$, при необходимости, может быть снято). Введена матрица-столбец весов траекторий:

$$E = (e_1, \dots, e_m, \dots, e_M)$$

Введена матрица F размера $TV \times M$ с элементами f_{nm} :

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & \dots & f_{1M} \\ \dots & \dots & \dots \\ f_{TV1} & \dots & f_{TVM} \end{pmatrix}.$$

Элемент f_{nm} матрицы F характеризует вклад m -й траектории в статистику n -го ЭОР. Или наоборот – вклад статистики n -го ЭОР в статистику m -й траектории, являясь производной $f_{nm} = \frac{\partial A_n}{\partial e_m}$. Тем самым матрицу F можно назвать матрицей частных производных или матрицей дифференциального оператора [1]. При этом F^T также является матричным преобразованием Хока.

Ожидаемые значения статистик ЭОР (элементов матрицы A_0 , подобной матрице A) при заданных E и F определяются выражением:

$$A_0 = FE. \quad (1)$$

Введен столбец статистик траекторий, накопленных в ДМПТТ согласно технологии Хока:

$$S^T = (s_1, \dots, s_m, \dots, s_M),$$

причем

$$S = F^T A.$$

Элементы S соответствуют потенциалам, пропорциональным энергии сигналов, накопленных вдоль возможных траекторий объектов.

Введена матрица взаимных влияний траекторий B , размерности $M \times M$, m -й столбец которой характеризует влияние объекта, движущегося по m -й гипотетической траектории, на все M статистик траекторий (потенциалов дискрет ДМПТТ). При использовании в качестве статистики траектории простой арифметической суммы статистик ЭОР, ей соответствующих, диагональные элементы матрицы B будут определяться количеством обзоров, в течение которых данная траектория принадлежит зоне обзора. Любой другой элемент матрицы B определяется числом ЭОР, одновременно соответствующих m -й и n -й траекториям.

При этом ожидаемые значения статистик дискрет ДМПТТ определяются выражением

$$S_0 = BE. \quad (2)$$

Введены два столбца ошибок определения значений статистик ЭОР ε_A и статистик траекторий (дискрет ДМПТТ) ε_S :

$$\varepsilon_A = (\varepsilon_{A1}, \dots, \varepsilon_{An}, \dots, \varepsilon_{ATV});$$

$$\varepsilon_S = (\varepsilon_{S1}, \dots, \varepsilon_{Sm}, \dots, \varepsilon_{SM}).$$

Считается, что процессы формирования статистик ЭОР, согласно (1), и статистик траекторий (дискрет ДМПТТ), согласно (2), формально могут быть представлены в виде:

$$A = A_0 + \varepsilon_A = FE + \varepsilon_A;$$

$$S = S_0 + \varepsilon_S = BE + \varepsilon_S.$$

Необходимо найти оценку элементов матрицы весов траекторий E и на ее основе принять решение о количестве и параметрах движения объектов.

Оценка весов траекторий методом наименьших квадратов.

Пусть в качестве критерия наилучшей оценки весов траекторий используется критерий минимума квадрата невязки. При этом возможно два варианта оценки. Во-первых, по минимуму квадрата невязки между элементами A и их ожидаемыми значениями

$$\begin{aligned} \hat{E} &= \arg \min_E (A - A_0)^T (A - A_0) = \\ &= \arg \min_E (A - FE)^T (A - FE) = \arg \min_E \varepsilon_A^T \varepsilon_A. \end{aligned} \quad (3)$$

Во-вторых, оценить элементы E можно по минимуму квадрата невязки между статистиками траекторий, накопленными в ДМПТТ, и ожидаемыми значениями этих статистик

$$\begin{aligned}\hat{E} &= \arg \min_E (S - S_0)^T (S - S_0) = \\ &= \arg \min_E (S - BE)^T (S - BE) = \arg \min_E \varepsilon_S^T \varepsilon_S.\end{aligned}\quad (4)$$

Известно [Ермаков], что вектор E , удовлетворяющий уравнению (4) находится как оценка метода наименьших квадратов (МНК):

$$\hat{E} = (B^T B)^{-1} B^T S.\quad (5)$$

По аналогии, из уравнения (3):

$$\hat{E} = (F^T F)^{-1} F^T A = B^{-1} S.\quad (6)$$

В дальнейшем полученные оценки элементов \hat{E} сравниваются с порогом, выставленным согласно критерию Неймана – Пирсона.

Процедура оценки весов траекторий (6) впервые была получена в работе [7] без привлечения понятий метода наименьших квадратов.

Как видно результат преобразования Хока S , полученный по выборке A , подвергается декоррелирующему преобразованию B^{-1} . В ряде случаев операция декорреляции не выглядит удобной из-за потерь в показателях качества обнаружения. Также не всегда удается обратить соответствующие матрицы. Использование в свою очередь операции псевдообращения еще более увеличивает энергетические потери.

Метод виртуальной табуляции многоцелевой функции правдоподобия. Существует принципиальная возможность избежать операции декорреляции статистик возможных траекторий. Данная возможность основана на использовании свойства множества подтвержденных траекторий: любое подмножество подтвержденного множества траекторий подтверждено. Под подтверждением следует понимать превышение порога обнаружения статистиками всех траекторий, входящих в итоговую оценку количества и параметров движения объектов $\hat{\Theta}_{\hat{Q}}$ по отдельности, а также статистиками всех подмножеств множества траекторий $\hat{\Theta}_{\hat{Q}}$. Иными словами, если некий порог обнаружения превысила статистика множества из пяти траекторий, то соответствующие пороги будут превышены и всеми статистиками подмножеств этих траекторий, состоящих из одного, двух, трех и четырех траекторий.

Тем самым метод обнаружения неизвестного числа траекторий в общем виде может быть следующим. С использованием параллельного M -канального обнаружителя траектории [6] выделяются траектории, статистики которых превышают порог обнаружения одной траектории.

Из данных траекторий формируются пары траекторий. Причем пары со статистиками, превышающими некий порог. Затем из данных пар формируются аналогичные тройки траекторий. Процесс объединения, укрупнения подмножеств траекторий продолжается, пока не сработает критерий останова. При этом наиболее значимое множество траекторий считается оценкой целевой обстановки.

Предлагаемый обнаружитель состоит из процедуры наращивания подмножеств подтвержденных траекторий и правила останова данного процесса с одновременной оценкой числа и параметров траекторий.

Процедура наращивания подмножеств подтвержденных траекторий основана на следующих исходных предположениях:

1. При наращивании подмножеств подтвержденных траекторий и их статистик учитываются только целевые ЭОР, т.е. ЭОР, соответствующие ожидаемому положению одного из объектов подмножества. Использование только целевых ЭОР позволяет избежать следующей ситуации. Имеют место случаи, при которых ни одна, ни даже две или три траектории не могут «объяснить» сигнальную обстановку в ЗО. Не могут «объяснить» в том смысле, что функция правдоподобия $P_{A/\Theta}(A/\Theta_Q)$ для $Q = 1, 2, 3$ всегда тождественна нулю. Например, при условных вероятностях правильного обнаружения $D = 1$ и ложной тревоги $F = 0$ в ЭОР на Т обзорах имело место по пять отметок. Только специальным образом подобранные пять и более траекторий обеспечат $P_{A/\Theta}(A/\Theta_Q) > 0$. Вместе с тем, если рассматривать только целевые ЭОР, подобная функция правдоподобия будет отлична от нуля и может быть использована для наращивания подмножеств подтвержденных траекторий.

2. Подтвержденным считается только то подмножество траекторий, в котором каждая траектория получает подтверждение: ее статистика превышает порог обнаружения одной траектории. Статистика траектории и критерий ее обнаружения находится методами математической статистики.

3. При применении предложенного метода в условиях, аналогичных приведших к оценкам (5), (6), они используются для оценки весов траекторий. При этом матрица F содержит только строки, соответствующие траекториям подтверждаемого множества. В противном случае может быть использовано понятие скрытых обзоров. При наличии пересекающихся траекторий ЭОР «пересечения» отдается траектории с большим весом, в других траекториях данный обзор исключается из рассмотрения, «скрывается». Подтвержденная траектория должна содержать не менее T_0 не «скрытых» обзоров. Иначе могут появиться подтвержденные траектории, которые не имеют собственных отметок. Иногда допустимо использование многофакторных моделей статистик ЭОР, позволяющих точнее описать статистические свойства этих статистик, при нахождении в ЭОР нескольких объектов.

Прекращение наращивания количества траекторий в множестве подтвержденных осуществляется при выполнении двух условий:

$$P_{A/\Theta}(A/\Theta_Q) > 0 \text{ или } Q \geq Q_{\min}; \quad (7)$$

$$P_{A/\Theta}(A/\Theta_{Q+1}) < P_{A/\Theta}(A/\Theta_Q) \text{ или } \log \frac{\max_{\Theta_{Q+1}} P_{A/\Theta}(A/\Theta_{Q+1})}{\max_{\Theta_Q} P_{A/\Theta}(A/\Theta_Q)} < \Pi_\alpha, \quad (8)$$

где Π_α – порог, соответствующий заданному уровню значимости α .

Условие (7) уже обсуждалось при рассмотрении первой исходной предпосылки. При этом Q_{\min} является минимальным числом объектов, при котором условная вероятность конкретной сигнальной обстановки при заданной целевой $P_{A/\Theta}(A/\Theta_Q)$ перестает быть тождественной нулю.

Условие (8) самоочевидно. При использовании критерия максимального правдоподобия без модификаций используется его первый вариант. Однако он не всегда является дееспособным [9, 10]. В связи с этим для определения числа объектов можно использовать критерий значимости [9], представленный вторым вариантом данного условия.

Формальная схема наращивания множества подтвержденных траекторий в статье не приводится из-за ее самоочевидности, а также ввиду ограничений на объем работы.

Анализ показателей качества обнаружения. При отсутствии траекторий, пересекающихся на интервале накопления, показатели качества предложенного обнаружителя практически соответствуют показателям качества независимых обнаружителей объектов, движущихся по детерминированным траекториям. Иными словами, потери, свойственные обнаружителю с декоррелирующим преобразованием [7] отсутствуют. Указанные потери в ряде случаев достигали 25% от уровня порогового сигнала [8]. При наличии пересекающихся траекторий показатели качества рассматриваемого обнаружителя ухудшаются. Однако эти ухудшения для практически значимых задач не превосходят единиц процентов и едва заметны.

Выводы. Предложен метод обнаружения неизвестного числа близких малоразмерных объектов. Как и известный метод [7], он позволяет накопить потенциалы, пропорциональные энергии сигналов вдоль траекторий объектов, не отслеживая их изменяющихся во времени координат. При этом отпадает необходимость предварительного нахождения и использования преобразования, декоррелирующего статистики всех возможных траекторий. Показатели качества такого метода обнаружения практически соответствуют показателям качества M^Q -канального метода. Однако необходимость использовать ДМПТТQ отпадает. В связи с этим рассматриваемый метод можно назвать виртуальным M^Q -канальным методом обнаружения неизвестного числа траекторий либо методом вирту-

альной табуляции многоцелевой функции правдоподобия. К недостаткам данного обнаружителя можно отнести необходимость хранения и повторного извлечения из буфера отдельных отметок.

Число возможных траекторий M велико. Целесообразно в дальнейшем разработать иерархические процедуры обнаружения одиночных траекторий, позволяющие выделять их с помощью существенно меньшего числа накопителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – К.: КвіЦ, 2000. – 428 с.
2. Саваневич В.Е. Оценка параметров близких траекторий с использованием совместного распределения отметок на обзорах // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ, 2003. – Вып. 3 (46). – С. 70 – 75.
3. Саваневич В.Е., Логачев С.В., Пугач А.В. Бесстробовый алгоритм оценки параметров близких траекторий // Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – № 2. – С. 4 – 8.
4. Саваневич В.Е., Симонова О.Г., Руденко Н.П. Оценка параметров зависимых линейных траекторий по смешанной выборке // Збірник наукових праць ІПМЕ. – К.: НАНУ, ІПМЕ, 2003. – Вып. 22. – С. 169 – 176.
5. Левин Б.Р., Тегина Н.В., Юдицкий А.И. Алгоритм различения траекторий движущихся объектов и оценки их координат // Радиоэлектроника и радиоэлектроника. – 1982. – Т. 27, № 10. – С. 1942 – 1948.
6. Деденок В.П., Писаренко Г.Г., Саваневич В.Е. Обнаружение объектов с локально неизменными параметрами движения // Збірник наукових праць міжнародного симпозиуму «Імовірнісні моделі та обробка випадкових сигналів і полів». – Т. 2. – Ч. 1 / Під ред. Я.П. Драгана. – Львів – Харків – Тернопіль, 1993. – С. 98 – 104.
7. Саваневич В.Е., Руденко Д.В. Показатели качества обнаружения неизвестного числа объектов с накоплением статистик в дискретной модели пространства параметров одной траектории и последующей их декорреляцией // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вып 2 (49). – С. 60 – 64.
8. Саваневич В.Е., Руденко Д.В. Использование преобразования Хо в случае наличия в информационном кадре многих объектов // Управление и связь. – Х.: НАНУ, ПАНИ, ХВУ, 1996. – С. 108 – 110.
9. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
10. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.

Поступила 2.09.2004

САВАНЕВИЧ Вадим Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, докторант ХВУ. В 1986 году окончил Харьковское ВУРЭ. Область научных интересов – обработка локационной информации, информметрия.