

Алгоритм траекторного сопровождения групповой маневрирующей цели в условиях многолучевого распространения сигнала в загоризонтной РЛС*

А.А. Коновалов

Аннотация

Рассматривается вопрос учета эффекта многолучевого распространения радиолокационного сигнала в ЗГ РЛС на этапе траекторной обработки. Приведена классификация способов учета многолучевого распространения, дано краткое описание двух наиболее распространенных алгоритмов DMPTF и MPCR. Предложен алгоритм ММ-MPCR как расширение алгоритма MPCR для сопровождения групповой маневрирующей цели. Для алгоритма ММ-MPCR разработана методика формирования гипотез отождествления, учитывающая наличие групповой цели.

The algorithm of multipath multitarget and maneuvering target tracking for the Over-the-Horizon Radar

A.A. Konovalov

Abstract

The target tracking algorithm taking into account multipath propagation of an Over-the-Horizon radar signal is discussed. Classification of the multipath tracking methods is given, and two of the most commonly used methods, DMPTF and MPCR, are briefly described. The new algorithm MM-MPCR is proposed as extended version of MPCR to multipath multitarget and maneuvering target tracking. The method for identification hypothesis generation in MM-MPCR algorithm is developed.

Одной из серьезных проблем загоризонтной радиолокации является многолучевое распространение, когда сигнал, отраженный от цели, поступает на приемную антенну по нескольким трассам. Разность путей часто приводит к тому, что пришедшие по ним отражения разрешаются при обнаружении, в результате чего цель оказывается представлена несколькими отметками за один интервал наблюдения. В данном материале рассматриваются методы учета эффекта многолучевого распространения на этапе траекторной обработки.

В общем случае в системе траекторной обработки, реализованной по традиционной схеме, многолучевые отметки будут восприняты как ложные, что может привести к снижению вероятности правильного отождествления, снижению точности оценки параметров движения цели вплоть до сброса сопровождения, к обнаружению и сопровождению нескольких траекторий для одной цели. Степень влияния эффекта многолучевого распространения на характеристики траекторной обработки зависит, во-первых, от состояния ионосферы и трассы распространения (количества каналов распространения сигналов; разности длин путей распространения; статистических параметров ионосферы, которые в совокупности определяют число путей распространения, вероятность обнаружения цели в данном канале распространения и степень рассеяния измерений); а во-вторых, от используемых траекторных алгоритмов, прежде всего отождествления (идентификации). Поскольку условие соответствия одной цели не более одной отметки в традиционных алгоритмах отождествления

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы" (государственный контракт № П521от 14.05.2010).

задается в явном виде, их некорректная работа при наличии многолучевого распространения не должна рассматриваться как недостаток. В то же время на их базе возможно построение алгоритмов отождествления в условиях многолучевого распространения, если ввести соответствующие допущения и скорректировать алгоритмы должным образом.

Задача учета многолучевого распространения имеет определенное сходство с построением траекторий по данным нескольких РЛС, которая решается в многопозиционных комплексах: необходимо сформировать единую оценку параметров движения цели на основе нескольких измерений, осуществляемых на фоне помех [1]. По аналогии с используемыми в многопозиционном сопровождении способами объединения, проблему многолучевого распространения в 3Г РЛС можно решать на основе объединения траекторий или объединения измерений.

Первый метод учета многолучевости заключается в том, чтобы строить траектории для каждого пути распространения, а затем объединять их в одну траекторию, соответствующую единственной цели [2]. Одним из наиболее эффективных является алгоритм многолучевого объединения траекторий DMPTF (Dynamic MultiPath Track Fusion), основанный на многогипотезном сопровождении [3]. В нем рекурсивно формируются гипотезы для всех возможных вариантов отождествления измерений, траекторий и путей распространения. Гипотезы отождествления генерируются путем построения дерева гипотез на каждом шаге оценивания траектории. Каждый путь через дерево (то есть каждая его ветвь) соответствует уникальному варианту отождествления радиолокационных траекторий с измерениями и возможными путями распространения. Алгоритм оценивает вероятность каждой гипотезы и вычисляет итоговую оценку состояния цели на основе всех доступных гипотез. Предполагается, что все объединяемые траектории обновляются одновременно. Учет динамики цели достигается за счет того, что на каждом шаге оценивания вместо создания нового дерева гипотез производится обновление существующего дерева с учетом новых данных. Для ограничения числа гипотез в алгоритме DMPTF используется метод рекурсивного отсечения гипотез, который на каждом шаге оценивания оставляет K лучших, то есть наиболее вероятных, гипотез (K -best). Кроме того, DMPTF имеет встроенный алгоритм реагирования на изменение числа путей распространения.

В качестве основного недостатка алгоритмов этой группы следует указать необходимость существования отдельной траектории для каждого из путей распространения, что не всегда имеет место. На практике многолучевые отметки могут разрешаться не на каждом обзоре, в результате повышается вероятность попадания нескольких многолучевых отметок в стробы сопровождения разных путей. Также возможны пропуски отметок для некоторых путей распространения, что приведет к разрывам траекторий. В таком случае алгоритм объединения существенно усложнится (нужно будет учитывать разрывы), для участков, где существуют не все из многолучевых траекторий, снизится точность оценивания.

Второй метод учета многолучевости основывается на последовательной обработке наборов измерений, приходящих от одной цели по разным путям распространения с одновременным формированием итоговой оценки параметров единой траектории цели. Задача учета многолучевого распространения сводится к отождествлению данных с соответствующими путями распространения. В настоящее время как наиболее перспективный рассматривается подход, лежащий в основе вероятностных алгоритмов отождествления, в частности, алгоритма PDA (Probabilistic Data Association). Одним из наиболее удачных фильтров, разработанных для сопровождения загоризонтных целей в условиях разрешаемой многолучевости и помех,

является фильтр MPCR (MultiPath Coordinate Registration) [2]. Он осуществляет отождествление измерений с траекториями с учетом возможного существования нескольких путей распространения, максимальное число которых полагается заранее известным. Подобно исходному алгоритму отождествления PDA, MPCR является алгоритмом оценивания условного среднего с глубиной памяти в один обзор. При наличии одного режима распространения MPDA сводится к PDA (аналогично тому, как JPDA сводится к PDA при наличии только одной цели). Для учета проблемы обнаружения траектории в алгоритм включается модель существования цели: вводится вероятность существования цели P_E , которая задается на начальном шаге и рекуррентно уточняется в процессе оценивания. Поскольку мгновенное значение P_E может сильно флуктуировать, оно сглаживается в скользящем окне. В алгоритме используется многоуровневая модель ионосферы, для примера рассматриваются уровни E и F, для которых существует 4 односкачковых путей распространения: EE, EF, FE, FF. Особенностью алгоритма MPCR является стохастическая модель ионосферы: высоты уровней h_E и h_F считаются случайными величинами, нормально распределенными с известными средними и СКО. Алгоритм MPCR лишен отмеченных выше недостатков алгоритма DMPTF. Однако в том виде, как он был описан в [2], алгоритм MPCR предназначен для сопровождения одиночной не маневрирующей цели, тогда как общая задача траекторного сопровождения подразумевает сопровождение групповой маневрирующей цели. Разумеется, в условиях коротковолновой радиолокации такая постановка задачи правомерна в ситуации, когда отдельные объекты групповой цели разрешаются станцией, а временной интервал обращения к цели позволяет говорить о возможности обнаружения маневра.

Рассмотрим изменения, которые следует внести в алгоритм MPCR для того, чтобы он мог сопровождать групповые маневрирующие цели. Полученный алгоритм назовем MM-MPCR (от англ. Multitarget / Maneuvering target MPCR).

Учет группового характера движения целей. Наиболее распространенным методом траекторного сопровождения групповой цели является алгоритм совместного вероятностного отождествления JPDA [1,4]. При его использовании полагается, что число сопровождаемых целей оценено ранее и равно N_T , и от каждой цели в наборе отметок присутствует не более одной отметки. Напротив, в MM-MPCR от цели может прийти несколько отметок, от нуля до числа путей распространения m . Отметки, попадающие в строб сопровождения каждой из целей, могут принадлежать как другой цели, так и этой же, в таком случае они считаются пришедшими по другим путям распространения.

В алгоритме JPDA по результатам анализа попадания отметок в индивидуальные стробы сопровождения всех целей группы составляется матрица стробирования, которая определяется как $\Omega = [\omega_{jt}]$, $j = 1, \dots, m_k$, $t = 0, 1, \dots, N_T$, бинарная величина ω_{jt} показывает, попадает ли отметка j в строб сопровождения траектории t . Индекс $t=0$ учитывает возможность того, что данная отметка является ложной. Из всех возможных комбинаций сочетаний пар отметка–траектория составляются возможные события совместного отождествления \mathcal{G}_i , $i=1, \dots, \Theta_k$. Каждое из них представляется с помощью матрицы отождествления:

$$\widehat{\Omega}(\mathcal{G}_i) = [\widehat{\omega}_{jt}(\mathcal{G}_i)], \text{ где } \widehat{\omega}_{jt} = \begin{cases} 1, & \theta_{jt} \in \mathcal{G}_i \\ 0, & \theta_{jt} \notin \mathcal{G}_i \end{cases},$$

где θ_{jt} – событие, заключающееся в том, что отметка j отождествлена с траекторией t в рамках события \mathcal{G}_i , t_j – индекс траектории, с которой отождествлено измерение j . Матрицы отождествления получают из матрицы стробирования путем перебора всех

возможных событий совместного отождествления по правилу: одна единица в строке и одна единица в столбце, исключая столбец $t=0$, в котором число единиц не ограничено.

Пусть сопровождается группа из $N_T = 3$ целей и на k -ом шаге оценивания получено $M_k = 6$ отметок, попавших в пересекающиеся стробы трех траекторий (см. рис. 1). Матрица стробирования и одна из матриц отождествления (для примера) имеют вид:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \hat{\Omega}(\mathcal{G}_1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

вероятность каждого события \mathcal{G}_i рассчитывается по стандартным формулам [1].

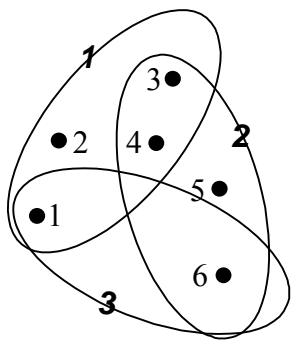


Рис. 1

В алгоритме MPCR на каждом k -ом обзоре получают Z_k векторов измерений, каждый из которых может являться ложной отметкой (помехой) или отметкой от цели, пришедшей по любому из действующих путей распространения. задается вектор отождествления \mathcal{I} , число элементов равно числу стробированных отметок M_k , значение элемента отражает возможные варианты отнесения данной отметки – ложная или соответствующая одному из путей [2].

Предположим, имеется строб с $M_k=6$ отметками при четырех путях распространения. Число элементов вектора отождествления \mathcal{I} равно 6, значение каждого p -го элемента отражает возможные варианты отнесения данной отметки – ложная ($\mathcal{I}_p = 0$) или соответствующая одному из путей ($\mathcal{I}_p = 1, 2, 3$ или 4). Число ненулевых элементов m в векторе может варьироваться от 1 до 4, при этом ненулевые элементы не должны повторяться.

Для выбранного в рамках данной гипотезы m вводится класс событий $\mathcal{E}_j(m)$ как j -ый способ выбора m режимов из набора возможных путей распространения. Всего таких классов будет C_4^m (число сочетаний из 4 по m), то есть $j=1, \dots, J(m) = C_4^m$. В каждом классе $\mathcal{E}_j(m)$ существует $P_{M_k}^m$ событий (число размещений из M_k по m с учетом их положения в векторе), индекс события внутри класса обозначим $i=1, \dots, I(m) = P_{M_k}^m$.

Обозначим $\psi_{i,j,m,k} = (i_1, \dots, i_{M_k})$ гипотезу, что цель существует в момент k , m режимов распространения (от 1 до 4), выбранные j -ым возможным способом, производят отметку в наборе M_k стробированных измерений из Z_k с i -ым возможным вариантом отождествления. Для покрытия всех возможных вариантов вводятся еще две гипотезы: 1) цели нет, и все измерения в суммарном стробе вызваны помехами, 2) цель существует, но все измерения – помехи. Далее рассчитываются вероятности сформированных таким образом гипотез, на их основе производится обновление оценки вектора состояния и его корреляционной матрицы [2].

Для алгоритма ММ-MPCR следует создать методику генерации матриц отождествления, описывающих возможные варианты отождествления отметок, траекторий и путей распространения. Элементы матрицы будем назначать как в векторе отождествления \mathcal{I} : 0 – для ложной отметки, положительное целое число, соответствующее номеру пути, для отметки от цели; а также введем прочерк (–) для невозможного варианта отождествления отметки и траектории. Поскольку для каждой

из целей может быть обнаружено несколько отметок соответственно значению числа активных путей, требование одного целочисленного элемента в каждом столбце, начиная со второго, снимается. Требование одного такого элемента в строке остается – каждая отметка может принадлежать только одной цели.

В алгоритме МРСР возможное число активных путей распространения для одной цели задавалось скалярной величиной m , в ММ-МРСР для групповой цели вводится вектор $\mathbf{m} = [m_1, m_2, \dots, m_{N_T}]$, составляющие которого задают возможное число активных путей распространения для каждого из N_T объектов групповой цели (для каждой реальной цели в данный момент времени может существовать свое число активных путей распространения).

Значения m_t должны удовлетворять следующим требованиям:

- $0 \leq m_t \leq M_{kt}, t = 1, \dots, N_T$ – число активных путей распространения для каждой цели не должно превышать числа отметок, попавших в ее строб сопровождения (допускается равенство m_t нулю, это означает, что для данной траектории отметок не обнаружено);
- $0 < \sum_{t=1}^{N_T} m_t \leq M_k$ – число активных путей распространения для всех целей группы не должно превышать общего числа стробированных отметок.

Таким образом, вместо одного числа m в ММ-МРСР задается набор векторов \mathbf{m}_i . Например, для матрицы стробирования (1) при 4 путях распространения возможны следующие значения векторов \mathbf{m} : $[4,2,0]$, $[4,1,0]$, $[4,1,1]$, $[4,0,1]$, $[4,0,2]$, $[3,3,0]$, $[3,2,1]$, $[3,2,0]$ и т. д. Число возможных векторов \mathbf{m} обозначим $I(\mathbf{m})$. Не все из сформированных векторов могут соответствовать физически реализуемым комбинациям отметок и траекторий, например, вектор $\mathbf{m}_i = [4,0,2]$ невозможен, поскольку первая отметка не может принадлежать одновременно первой и третьей траектории. Проверку на физическую реализуемость можно производить на этапе формирования набора векторов \mathbf{m} или далее при формировании классов событий.

Затем для каждой реализации вектора \mathbf{m}_i определяется множество классов событий $\mathcal{E}_j(\mathbf{m}_i), j = 1, \dots, J(\mathbf{m}_i)$, описывающие возможные варианты формирования непротиворечивого набора отметок для всех объектов групповой цели. Непротиворечивость означает, что каждая отметка может принадлежать только одной цели либо являться ложной, число отметок от цели для t -ой траектории задается соответствующим элементом вектора \mathbf{m}_i . Класс событий получают из матрицы стробирования Ω по следующему правилу: число единиц в столбце для каждой t -ой цели равно m_{it} , в каждой строке присутствует только одна единица; для строк, в целевых столбцах которых единиц не оказалось, единица выставляется в левом столбце ложных отметок. Например, для вектора $\mathbf{m}_i = [3,2,1]$ возможны классы событий:

$$\mathcal{E}_j(\mathbf{m}_i) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathcal{E}_{j+1}(\mathbf{m}_i) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \dots \quad (2)$$

Далее для каждого класса составляются собственно события группового многолучевого отождествления \mathcal{G}_{ijk} , которые задают соответствие отметок и путей распространения при заданном в рамках класса распределении отметок по целям.

События отождествления теперь имеют тройную индексацию: (i) для вектора \mathbf{m} , (j) для класса $\mathcal{E}(\mathbf{m}_i)$ и (k) для события внутри класса: \mathcal{G}_{ijk} , где $i=1, \dots, I(\mathbf{m})$, $j=1, \dots, J(\mathbf{m}_i)$, $k=1, \dots, K(\mathcal{E}_j(\mathbf{m}_i))$. События отождествления получают из матрицы класса путем замены единиц на номера путей распространения всеми возможными вариантами так чтобы элементы в столбце не повторялись, их положение в столбце существенно. Отметки, признанные ложными, обозначаются нулем (ранее – единицей) в соответствующей строке первого столбца, а невозможные варианты отождествления заменяются на прочерки (ранее – нули). Для класса $\mathcal{E}_j(\mathbf{m}_i)$ из (2) можно получить следующие события группового многолучевого отождествления

$$\mathcal{G}_{ijk} = \begin{bmatrix} - & 1 & - & - \\ - & 2 & - & - \\ - & 3 & - & - \\ - & - & 1 & - \\ - & - & 2 & - \\ - & - & - & 1 \end{bmatrix}, \mathcal{G}_{ijk+1} = \begin{bmatrix} - & 1 & - & - \\ - & 2 & - & - \\ - & 4 & - & - \\ - & - & 1 & - \\ - & - & 2 & - \\ - & - & - & 1 \end{bmatrix}, \dots \quad (3)$$

Для каждого t -го целевого столбца число вариантов равно $P_4^{m_{ti}}$ (число размещений из 4 по m_{ti}), всего событий в классе – $K(\mathcal{E}_j(\mathbf{m}_i)) = \prod_t P_4^{m_{ti}}$. Матрицы $\hat{\Omega}(\mathcal{G}_i)$, составленные в алгоритме JPDA, соответствуют частному случаю $\mathbf{m}_i = [1, 1, 1]$.

Итак, для формирования совокупности матриц группового многолучевого отождествления необходимо сформировать следующие множества:

- множество векторов \mathbf{m}_i , $i=1, \dots, I(\mathbf{m})$, задающих число путей распространения для всех объектов группы;
- для каждого вектора \mathbf{m}_i – множество классов $\mathcal{E}_j(\mathbf{m}_i)$, $j=1, \dots, J(\mathbf{m}_i)$, задающих возможные варианты распределения многолучевых и ложных измерений по целям;
- для каждого класса $\mathcal{E}_j(\mathbf{m}_i)$ – множество событий отождествления \mathcal{G}_{ijk} , $k=1, \dots, K(\mathcal{E}_j(\mathbf{m}_i))$, задающих варианты распределения путей распространения для данного варианта распределения измерений по целям.

К этим гипотезам добавляется «нулевая» гипотеза, согласно которой все стробированные отметки являются ложными. Матрица отождествления этой гипотезы имеет нули в первом столбце и прочерки в остальных. Вероятности сформированных таким образом гипотез вычисляются аналогично алгоритму JPDA. Затем на их основе формируется результирующая оценка вектора состояния [1].

Учет маневров цели в системе траекторной обработки при многолучевом распространении. Традиционный фильтр Калмана, который используется в исходном алгоритме MPCR, предназначен для оценки параметров цели, движущейся прямолинейно с постоянной скоростью. Любое отклонение цели от такого типа движения приведет к расхождению выходной оценки фильтра Калмана с реальным положением цели, что ухудшает точность сопровождения и может закончиться сбросом траектории. Выходом из данной ситуации является замена «штатного» фильтра Калмана на алгоритм фильтрации, специально предназначенный для сопровождения маневрирующей цели.

В современных системах траекторной обработки для сопровождения маневрирующей цели обычно используются многомодельные алгоритмы [1,5]. Основываясь на представлении движения цели в виде последовательной смены моделей, многомодельные алгоритмы включают в свой состав набор из N моделей –

кандидатов на соответствие характеру движения цели в данный момент, а также банк элементарных фильтров, соответствующих каждой из этих моделей. Результирующая оценка вычисляется на основе использования оценок, формируемых всеми элементарными фильтрами, с учетом их правдоподобия. В настоящее время наибольшее распространение получил интерактивный многомодельный фильтр ИММ, для которого характерно сочетание достаточно высокой точности с относительно небольшими вычислительными затратами. Это субоптимальный рекуррентный фильтр с глубиной памяти в один шаг; каждый из его элементарных фильтров инициализируется своим значением, при формировании которого учитывается, в какой степени каждая из моделей соответствует состоянию, в котором система находилась в предыдущий момент времени. Решение ряда вопросов, касающихся работы фильтра ИММ (выбор набора моделей, описывающих динамику движения целей (надводных, воздушных или и тех и других одновременно); выбор переходных вероятностей для марковской цепи, описывающей процесс перехода цели из одного состояния маневра в другое; выбор начальных вероятностей моделей), определяется разработчиком в зависимости специфики поставленной задачи сопровождения.

Список литературы

1. Y. Bar-Shalom and X.R. Li. Multitarget–Multisensor Tracking: Principles and Techniques. Storrs, YBS Publishing, 1995. 640 p.
2. G.W. Pulfod. OTHR Multipath Tracking with Uncertain Coordinate Registration // IEEE Transactions ON Aerospace and Electronic Systems. 2004, Vol. 40, №. 1 January. Pp. 38-56.
3. P.W. Sarunic, K.A.B. White, M.G. Rutten. Over-the-Horizon Radar Multipath and Multisensor Track Fusion Algorithm Development. Report DSTO-RR-0223. DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory. Edinburgh, Australia. 2001. 73 p.
4. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев: КВИЦ, 2000. 428 с.
5. X. R. Li, V. P. Jilkov. A survey of maneuvering target tracking – part V: Multiple-Model Methods. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2005 Vol. 41, №4 October. Pp. 1255–1321.

Сведения об авторе



Коновалов Александр Анатольевич. Родился в 1973 г. В 1996 г окончил Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет «ЛЭТИ». В настоящее время – научный сотрудник СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Сфера научных интересов: многодиапазонные многопозиционные радиолокационные комплексы, траекторная обработка радиолокационной информации, методы объединения данных. Автор 17 работ, в т.ч. 1 монографии (в соавторстве).

E-mail: al_an_kon@mail.ru