

А.А. Коновалов

Формирование строба захвата траектории с учетом погрешностей радиолокационных измерений

*Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»*

Под обнаружением траектории понимают процесс взятия на сопровождение новых целей, появляющихся в зоне обзора РЛС [1]. В общем случае алгоритм обнаружения траектории цели включает в себя два этапа:

- этап завязки траектории, где устанавливается факт возможного наличия новой цели и оцениваются первоначальные параметры ее движения;
- этап подтверждения завязанной траектории, на котором уточняется, что в данной области пространства есть цель с оцененными ранее параметрами движения.

Этап завязки траектории решает две задачи. Во-первых, отбрасывание отметок, которые заведомо не могут быть соотнесены с данной траекторией вследствие несоответствия предполагаемой динамике цели. Во-вторых, предварительная оценка неизвестных параметров движения цели (обычно вектора скорости), которые затем уточняются на этапе подтверждения. Для такой оценки достаточно двух измерений координат, поэтому на этапе завязки обычно используют две отметки.

Задача завязки траектории ставится следующим образом. Получена первая отметка, предварительно принимаемая за начало новой траектории, она состоит из вектора наблюдения z_1 и его корреляционной матрицы P_1 . Цель движется в неизвестном направлении со скоростью v , которая может принимать любое значение в интервале $v_{min} \leq v \leq v_{max}$. Через временной интервал τ получена новая отметка z_2 с корреляционной матрицей P_2 . Требуется принять решение о возможной принадлежности новой отметки завязываемой траектории потенциальной цели.

Обычно решение принимается по результатам проверки соответствия отметки тем или иным предположениям о характере движения цели и процессе измерения. Для этого производится анализ попадания второй отметки в некоторую пространственную область - строб захвата, размер и положение которого соответствуют данным предположениям. За центр строба захвата принимаются координаты первой отметки. Его размер традиционно определяется с использованием априорной информации о характере движения сопровождаемых целей, а именно максимальной v_{max} и минимальной

v_{min} возможными скоростями [1, 2]. Тогда строб захвата имеет форму кольца, его внутренний радиус на первом обзоре равен $R_{min} = v_{min} \tau$, внешний $R_{max} = v_{max} \tau$, где τ – временной интервал между отметками.

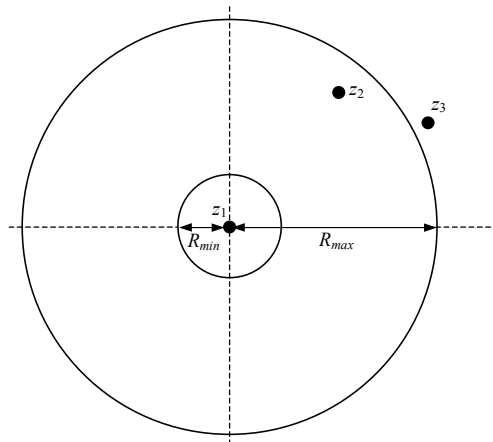
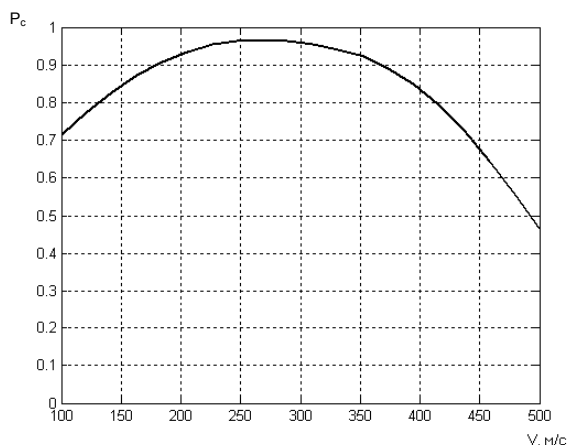


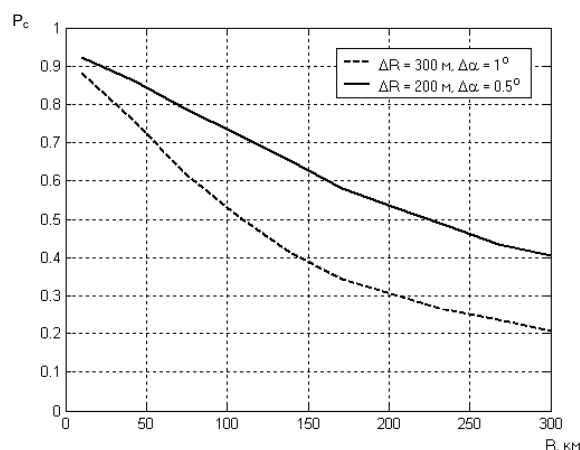
Рисунок 1. Кольцевой строб захвата в традиционном алгоритме.

Однако такой подход не учитывает погрешности измерения положения цели, которые имеют место как для первой (начальной), так и второй (стробируемой) отметки. Это приводит к тому, что часть отметок от целей, попадающая за пределы кольцевого строба вследствие ошибок измерения, не участвует в образовании траектории. Как следствие – реальная вероятность обнаружения траектории получается ниже, чем считается при аналитических оценках (обычно вероятность стробирования считается равной 1).

Оценим, в какой степени неучет погрешностей скажется на вероятности стробирования. Пусть цель находится на дальности 50 км, погрешности измерения РЛС 200 м по дальности и $0,5^\circ$ по азимуту, интервал между отметками 5 с, ожидаемая скорость цели находится в диапазоне от 100 до 500 м/с (360 – 1800 км/ч). На рис. 2,а представлена зависимость вероятности попадания отметки в кольцевой строб от скорости цели, полученная в ходе статистического моделирования. Чем ближе скорость цели к границам интервала, тем выше вероятность того, что отметка выйдет за пределы кольца. При этом вероятность попадания в строб при минимальной скорости выше, чем при максимальной (при малой скорости отметка может попасть «на другой берег» кольца). На рис. 2,б – зависимость вероятности попадания второй отметки в кольцевой строб от дальности при разных значениях погрешностей измерения по дальности и по азимуту. Эта зависимость объясняется тем, что рассеяние отметки относительно истинного положения растет с увеличением дальности и погрешности.



а)



б)

Рисунок 2. Зависимость вероятности стробирования от дальности и скорости цели.

Таким образом, вероятность стробирования в применяемой традиционно методике расчета строба захвата зависит от дальности цели, ее реальной скорости и погрешностей измерения координат. Кроме того, она может принимать весьма низкие значения (0,4-0,7) и фактически является случайной величиной. Такая ситуация является крайне нежелательной, поэтому возникла необходимость в разработке алгоритма захвата, имеющего известную (лучше всего – задаваемую при проектировании) вероятность захвата. Для этого, очевидно, необходимо учитывать погрешности измерений. Цель настоящей статьи заключается в разработке метода расчета строба захвата, учитывающего погрешности радиолокационных измерений, и обеспечивающего вероятность захвата не хуже заданной.

Методика расчета строба захвата, учитывающая погрешности измерений, строится из следующих соображений. Первая стадия, как в традиционном способе, заключается в проверке попадания отметки в кольцевой строб, использующем априорную информацию о максимальной и минимальной скоростях сопровождаемых целей. Однако при непопадании в него отметки процедура продолжается проверкой попадания измерения в корреляционный строб, выставляемый таким образом, чтобы вероятность выхода отметки за его пределы даже для целей, движущихся с предельно малыми или большими скоростями не превышала заданную.

Таким образом, проверка попадания в строб захвата второй отметки, состоит из следующих операций (см. рис. 3):

- вокруг первой отметки строится кольцо с радиусами $R_{\min} = v_{\min} \tau$ и

$$R_{\max} = v_{\max} \tau;$$

- проверяется попадание в него второй отметки, если результат положительный, траектория считается завязанной;
- при непопадании определяются координаты точки пересечения луча, выходящего из первой отметки и проходящего через вторую, с внутренней c_{min} или внешней окружностью c_{max} кольца;
- проверяется попадание второй отметки в корреляционный строб с центром в найденной точке пересечения, размер которого определяется суммой корреляционных матриц обоих измерений и заданной вероятностью стробирования.

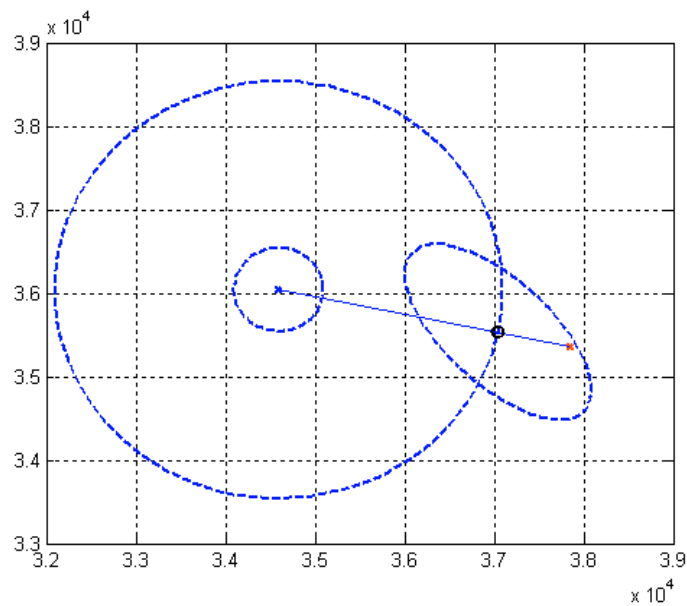


Рисунок 3. Формирование строба захвата.

Первая операция соответствует традиционной процедуре завязки траектории. Нахождение координат точек пересечения луча с окружностями сводится к вычислению угла β между горизонтальной осью кольца и лучом: $\beta = \text{atg}((y_2 - y_1) / (x_2 - x_1))$ и добавки к координатам центра кольца:

$$\mathbf{c}_{\max} = \mathbf{z}_1 + R_{\max} \cdot \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix}, \quad \mathbf{c}_{\min} = \mathbf{z}_1 + R_{\min} \cdot \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix}.$$

Проверка попадания отметки в корреляционный строб осуществляется известным способом, используемым при стробировании на этапе сопровождения [3]. Отклонение второй измеренной отметки от центра строба определяется суммарными ошибками измерения первой и второй отметок. Эти ошибки полагаются независимыми и нормально распределенными. Размер корреляционного строба зависит от заданной вероятности попадания в него отметки.

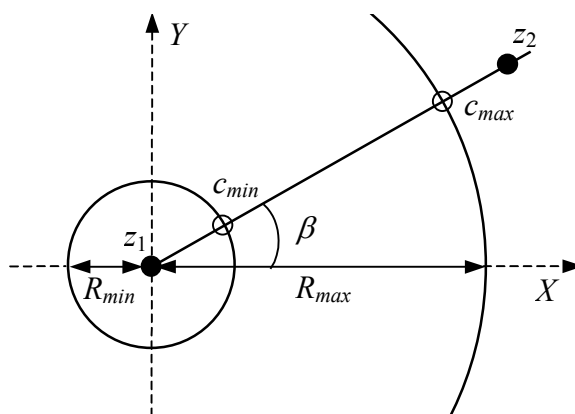


Рисунок 4. К вычислению размера корреляционного stroba.

Процедура проверки попадания второй отметки в корреляционный strob включает в себя следующие действия:

- вычисляются вектор невязки $v = z_2 - c_{\min}$ ($v = z_2 - c_{\max}$) и его корреляционная матрица $S = P_1 + P_2$,
- вычисляется квадратичная форма $\rho = v^T S^{-1} v$,
- значение ρ сравнивается с порогом стробирования γ , и если оно не превосходит порог, отметка попала в strob.

Значение порога стробирования γ вычисляется заранее при помощи обратной функции распределения вероятностей χ^2 для заданной вероятности стробирования P_c и степенью свободы, равной размерности измерения [4].

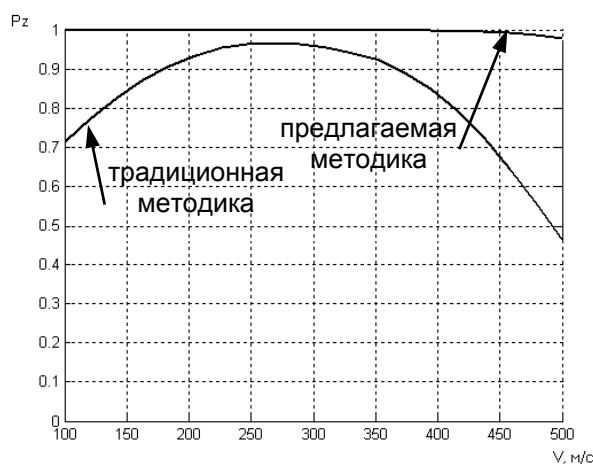


Рисунок 5. Сравнение вероятностей захвата по двум методикам.

Данный способ обеспечивает вероятность стробирования не менее заданной для всех скоростей цели. Реально же по этой методике вероятность стробирования получается выше, чем задаваемая (на рис. рис 5.

$P_c=0.95$). Обратимся еще раз к рисунку 3. Видно, что часть из отметок, вышедших за пределы корреляционного строга, окажутся в кольцевом строге и будут использованы в дальнейшем обнаружении. Именно на эту добавку и возрастет вероятность стробирования.

Можно достаточно просто оценить границы, в которых будет находиться реальная вероятность стробирования для целей на максимальных скоростях. В одной из крайних ситуаций, когда дуга круга диаметра R_{max} пересекает эллипс практически по прямой, вне кольца останется ровно половина отметок, не попавших в строга. В этом случае имеем максимальную реальную вероятность стробирования, которая определяется как $P_{c_{max}}^* = P_c + (1 - P_c) / 2 = (1 + P_c) / 2$. В другой крайней ситуации весь круг оказывается внутри эллипса, тогда имеем $P_{c_{min}}^* = P_c$. В иных вариантах реальная вероятность принимает значения внутри этого интервала.

До сих пор мы анализировали вероятность стробирования, то есть попадания отметки от истинной цели в строга захвата, при разных способах построения строга. Для получения вероятности захвата траектории ее нужно умножить на вероятности обнаружения первой и второй отметок P_{d1} и P_{d2} .

Отметим, что увеличение вероятности стробирования для истинных целей достигается в предложенном методе за счет повышения вероятности обнаружения ложной траектории, которая должна быть скорректирована на этапе подтверждения траектории.

Список литературы:

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – Киев: КВИЦ, 2000. – 428 с.
2. Информационные технологии в радиотехнических системах. / Под ред. И.Б. Федорова. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004. – 768 с.
3. Y. Bar-Shalom and X.R. Li. Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques. – Storrs, CT, YBS Publishing, 1995. – 615 p.
4. Ривкин С.С., Ивановский Р.И., Костров А.В. Статистическая оптимизация навигационных систем. – Л.: Судостроение, 1976. – 280 с.