

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СОПРОВОЖДЕНИЯ ЦЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЭКВИВАЛЕНТНОГО РАЗМЕРА АПЕРТУРЫ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКРИМИНАТОРА

к.т.н. В.Ш. Хисматуллин, к.т.н. А.А. Ковальчук,
к.т.н. А.А. Сосунов, к.т.н. И.И. Сачук
(представил д.т.н., проф. А.В. Галенко)

Предложена методика оценки вероятности устойчивого сопровождения целей, основанная на использовании эквивалентного размера апертуры характеристики дискриминатора. Получена зависимость эквивалентного размера апертуры характеристики дискриминатора радиотехнической следящей системы от отношения сигнал/шум.

Постановка проблемы. Основной характеристикой устойчивости сопровождения целей радиотехническими следящими системами (РТСС) является вероятность отсутствия срыва слежения в течение определенного интервала времени. Для ее расчета в общем случае необходимо решать уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова для эволюции плотности распределения вероятностей вектора ошибок экстраполяции состояния цели. Однако вычислительная сложность решения этого уравнения параболического типа в совокупности с нелинейными характеристиками дискриминаторов, определяющими граничные условия, не позволяет получить его аналитическое решение. Исключение составляет рассмотренный в [1] частный случай непрерывной системы первого порядка, причем вместо реальной дискриминационной характеристики авторами используется ее аппроксимация в виде участка с постоянной крутизной в пределах эквивалентного размера апертуры $\pm L_x/2$, и равная нулю за этими пределами (рис. 1, сплошная линия). В этом случае полагается, что срыв слежения происходит при первом достижении ошибкой сопровождения величины $\pm L_x/2$, и поэтому оценку устойчивости автосопровождения можно проводить путем сопоставления ошибки с полушириной эквивалентного размера апертуры характеристики дискриминатора.

Анализ литературы. В [1 – 3] и других известных работах вопросы, связанные с методикой и результатами определения эквивалентного размера апертуры дискриминатора, не рассматривались. В [4] предложено применить эквивалентную кусочно-линейную аппроксимацию дискриминаци-

онной характеристики для оценки устойчивости автосопровождения в дискретных РТСС высокого порядка путем определения вероятности попадания ошибки сопровождения цели по координате $x(nT)$ (дальности, радиальной скорости, угловым координатам) внутрь интервала $(-L_x/2, L_x/2)$.

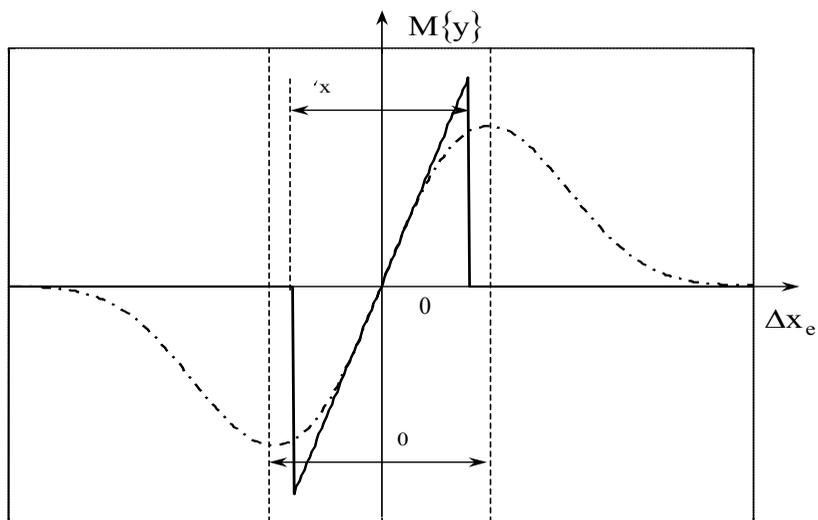


Рис. 1. Аппроксимация дискриминационной характеристики

При анализе устойчивости сопровождения в системах высокого порядка с помощью такого подхода не учитывается вероятность возвращения ошибки сопровождения в последующих радиоконтактах в допустимые пределы из-за особенностей эволюции плотностей распределения вероятностей для производных ошибки сопровождения. Однако, вследствие резкого возрастания ошибок измерения в дискриминаторе при приближении ошибки сопровождения цели к границам апертуры дискриминатора [3, 11, 12], вероятность возвращения ошибки сопровождения в последующих радиоконтактах в допустимые пределы становится чисто гипотетической и может не приниматься в расчет.

Цель статьи. Целью данной статьи является разработка методики, позволяющей производить оценку устойчивости сопровождения целей радиотехническими следящими системами дискретного действия с использованием величины эквивалентного размера апертуры характеристики дискриминатора, зависящей от отношения сигнал/шум.

Содержательное описание и математическая формулировка задачи. В следящих системах дискретного действия ошибки сопровождения являются одновременно ошибками экстраполяции

$$\Delta x_e(nT) = x(nT) - x_e(nT), \quad (1)$$

где $x(nT)$, $x_e(nT)$ – сопровождаемая координата и ее экстраполированное к данному радиоконтакту значение соответственно.

Как известно, в линейных следящих системах дискретного действия и при линейных моделях движения цели и наблюдений эти ошибки имеют нормальный закон распределения [5, 8]. Тогда вероятность нахождения ошибки сопровождения в пределах $\pm L_x/2$ к очередному радиоконтакту будет определяться с помощью функции ошибок

$$P_{1x}(nT) = 0.5 \left[\operatorname{erf} \left[\frac{0,5L_x + m_e(nT)}{\sqrt{2}\sigma_e(nT)} \right] + \operatorname{erf} \left[\frac{0,5L_x - m_e(nT)}{\sqrt{2}\sigma_e(nT)} \right] \right], \quad (2)$$

где $m_e(nT)$, $\sigma_e(nT)$ – соответственно математическое ожидание (систематическая составляющая) и среднеквадратическое отклонение ошибки сопровождения (экстраполяции) координаты к очередному радиоконтакту.

В случае, если алгоритмы оценивания и экстраполяции следящей системы имеют структуру, адекватную характеру движения цели, систематическая составляющая ошибки равна нулю, и (2) приводится к виду

$$P_{1x}(nT) = \operatorname{erf} \left[\frac{L_x}{2\sqrt{2}\sigma_e(nT)} \right]. \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) в первом приближении могут выступать как характеристики вероятности отсутствия срыва слежения в течение одного интервала между радиоконтактами с целью. График зависимости (3) приведен на рис. 2.

На практике такое приближение будет давать вполне приемлемый результат при $|m_e| + \sigma_e \ll L_x/2$, т.е. при $P_{1x} \rightarrow 1$. Если же ошибка сопровождения соизмерима с полушириной апертуры дискриминатора, что имеет место при малых отношениях сигнал/шум (ОСШ), то из-за нелинейности реальных характеристик дискриминаторов плотности распределения вероятностей ошибок сопровождения будут достаточно заметно отличаться от нормальных. В этом случае для оценки вероятности отсутствия срыва слежения с помощью выражений (2), (3) предлагается учитывать эффекты, возникающие вследствие отклонения плотности распределения вероятностей ошибок сопровождения от нормальных, путем введения зависимости эквивалентного размера апертуры от величины ОСШ. При подборе зависимости эквивалентного размера апертуры от ОСШ главным критерием, гарантирующим возможность использования формул (2), (3) для оценки вероятности отсутствия срыва слежения, должно быть совпадение результатов статистических испытаний на

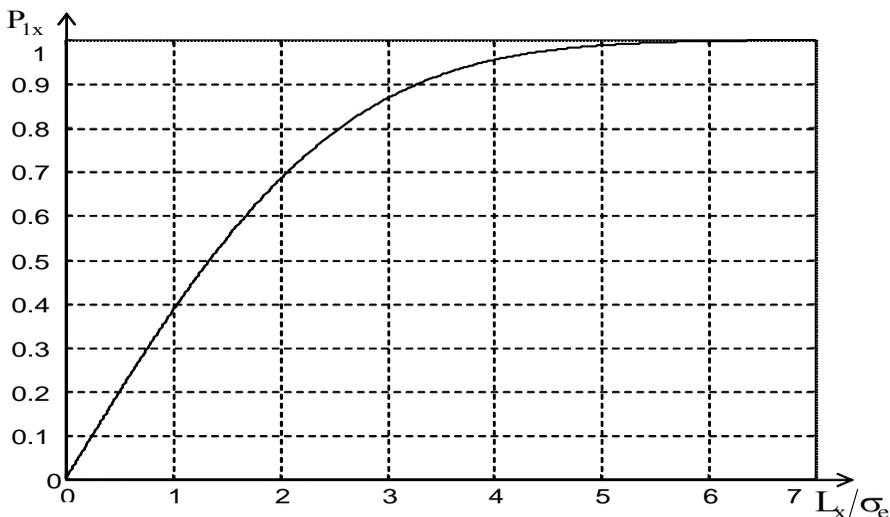


Рис. 2. График зависимости вероятности P_{1x} от отношения L_x/σ_e

Методика решения задачи. Итак, решение задачи определения устойчивости сопровождения с помощью эквивалентного размера апертуры характеристики дискриминатора проводится следующим образом.

На первом этапе выполняется подготовка исходных данных для проведения статистического эксперимента:

- 1) разрабатывается статистическая модель движения цели;
- 2) рассчитываются статистические характеристики реального дискриминатора РТСС;
- 3) задаются структура и параметры алгоритмов оценивания и экстраполяции координат цели.

На втором этапе проводится статистический эксперимент по определению зависимости вероятности отсутствия срыва слежения от ОСШ в РТСС с реальным дискриминатором.

На третьем этапе отыскивается зависимость эквивалентного размера апертуры характеристики дискриминатора L_x от ОСШ, дающая по результатам аналитических расчетов на основании формул (2), (3) те же значения вероятности отсутствия срыва слежения, что и система с реальным дискриминатором.

На четвертом этапе осуществляются необходимые исследования устойчивости сопровождения РТСС с использованием эквивалентного размера апертуры дискриминатора и уравнений (2), (3).

Недостатком данной методики является необходимость проведения сложного и объемного статистического исследования на втором этапе. Однако проведение статистического эксперимента для определенного типа дискриминатора достаточно выполнить только один раз. Поэтому несомненным достоинством приведенной методики является высокая точность результатов, сочетающаяся с простотой вычислений при исследовании влияния структуры и параметров алгоритмов оценивания и экстраполяции координат целей на устойчивость сопровождения в системах, использующих определенный тип дискриминатора.

Эквивалентный размер апертуры определяется применительно к конкретному типу дискриминатора и поэтому зависит от его структуры и параметров. Указанное обстоятельство означает, что эквивалентный размер апертуры выступает характеристикой качества дискриминатора (помимо традиционно используемых дискриминационной и флюктуационной характеристик), определяющей устойчивость сопровождения, и может использоваться для оптимизации структуры и параметров дискриминатора по критерию максимума устойчивости сопровождения. Однако данный вопрос выходит за рамки проводимых исследований и поэтому в дальнейшем не рассматривается.

Результаты решения задачи. На основании предложенной методики был выполнен расчет эквивалентных размеров апертуры характеристик для следующих дискриминаторов:

– временной дискриминатор, выполненный на двух селекторах, схеме вычитания и интеграторе со сбросом [3, 10]; импульсы сигнала имеют форму, близкую к гауссовой, длительностью 0,75 мкс, длительность селекторных импульсов, имеющих прямоугольную форму и следующих друг за другом, 0,4 мкс;

– частотный дискриминатор, выполненный на расстроенных контурах с разносом по частоте 500 Гц; ширина спектра сигнала 450 Гц;

– угловой дискриминатор, выполненный на основе моноимпульсного суммарно-разностного метода формирования пеленгационной характеристики; в трактах приемников используется нормировка усиления по величине сигнала на выходе приемника суммарного канала; парциальные диаграммы разнесены на угол 0,01 рад при ширине каждой из них по уровню половинной мощности 0,012 рад.

В статистическом эксперименте по оценке устойчивости сопровождения на втором этапе использовалась стохастическая модель движения маневрирующей цели, основанная на гипотезе об экспоненциально коррелированных вторых производных сферических координат цели со среднеквадратическим отклонением в линейной мере, равным 35 м/с^2 , и

постоянной времени корреляции 8 с [6, 7, 14]. Алгоритмы оценивания и экстраполяции координат имели структуру и параметры, полностью адекватные моделям движения цели и наблюдений [5, 6, 9, 13]. Вследствие этого исследуемые системы не имели систематической ошибки и являлись оптимальными по критерию минимума дисперсии ошибки сопровождения, и определение эквивалентных размеров апертуры L_x выполнялось по формуле (3).

По результатам исследования найдены зависимости относительного эквивалентного размера апертуры L_x/L_0 , где L_0 – ширина апертуры статической характеристики дискриминатора от ОСШ, которые приведены на рис. 3 (сплошная линия – временной дискриминатор, пунктирная – частотный дискриминатор, штрих-пунктирная – угловой дискриминатор).

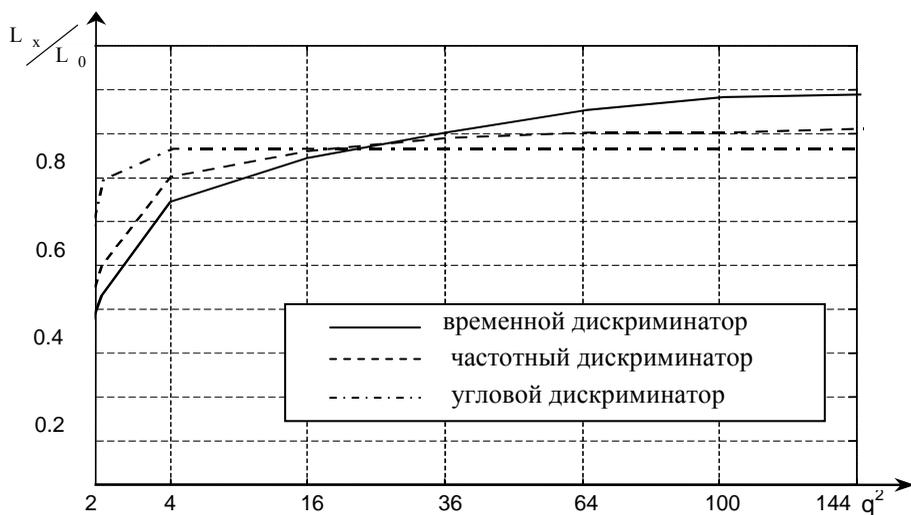


Рис. 3. Зависимость отношения L_x/L_0 от ОСШ

Из приведенных зависимостей следует, что, начиная от некоторых ОСШ, эквивалентный размер апертуры практически постоянен (во временном дискриминаторе при $q^2 > 65..100$, в частотном при $q^2 > 16..36$, а в угловом уже начиная от $q^2 = 4$). Постоянство параметра L_x свидетельствует о том, что в указанных условиях отклонение плотности распределения вероятностей ошибок сопровождения от нормальной незначительное, и поэтому результаты оценки вероятности отсутствия срыва слежения не нуждаются в дополнительной корректировке. При уменьшении ОСШ

ниже некоторого порогового значения, которое для рассмотренных дискриминаторов составляет около 4 (по мощности), эквивалентный размер апертуры резко уменьшается, что свидетельствует, во-первых, о появлении существенных отклонений плотности распределения вероятностей ошибок сопровождения от нормального закона, и, во-вторых, о резком снижении вероятности отсутствия срыва слежения.

Ширина апертуры эквивалентных характеристик L_x во всех исследованных дискриминаторах оказалась меньше ширины апертуры их статических характеристик L_0 . Необходимо отметить, что в известной литературе [2, 3 и др.] полагается, что эквивалентная характеристика имеет ширину, большую ширины апертуры статической характеристики.

Дополнительными исследованиями установлено также, что эквивалентный размер апертуры практически не зависит от периода измерения координат, если он не превосходит $1c$, и слабо зависит от выбора параметров алгоритмов оценивания и экстраполяции. Указанные свойства подтверждают возможность широко применять весьма простую методику оценки устойчивости сопровождения в соответствии с выражениями (2), (3).

Выводы. Для оценки устойчивости сопровождения целесообразно применять методику, основанную на использовании эквивалентного размера апертуры дискриминатора. Расчет величины эквивалентного размера апертуры дискриминатора и его зависимости от ОСШ и от параметров и характеристик дискриминатора выполняется на основании результатов статистического эксперимента по оценке устойчивости сопровождения в РТСС с реальными характеристиками. При достаточно больших ОСШ величина эквивалентного размера апертуры практически не зависит от ОСШ, а при малых – резко уменьшается. Результаты статистического эксперимента показали, что величина эквивалентного размера апертуры дискриминатора меньше ширины апертуры его статической характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

Руина Дж.П., Ван-Валькенбург М.И. Статистический анализ систем автоматического сопровождения // В кн. "Труды I-го Международного конгресса ИФАК. Статистические методы исследования". – Изд. АН СССР. – 1961. – Т. 3. – С. 247 – 263.

Обрезков Г.В., Разевиг В.Д. Методы анализа срыва слежения. – М.: Сов. радио, 1972. – 240 с.

Первачёв С.В. Радиоавтоматика. – М.: Радио и связь, 1982. – 296 с.

Хисматулин В.Ш., Сачук И.И., Ковальчук А.А. Оценка вероятности

надежного сопровождения аэродинамических целей многоканальной радиолокационной станцией // Сборник научных трудов ХГАУ. – Х.: НАКУ «ХАН». – 2001. – Вып. 22. – С. 259 – 262.

Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: Пер. с англ. – М.: Связь, 1976. – 496 с.

Зингер Р.А. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью // Зарубежная радиоэлектроника. – 1971. – № 8. – С. 40 – 57.

Зингер Р.А., Бенке К.В. Оценка характеристик и выбор фильтров сопровождения в реальном масштабе времени для тактических систем вооружения // Зарубежная радиоэлектроника. – 1972. – № 1. – С. 44 – 60.

Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л. Идентификация систем управления: Пер. с англ. – М.: Наука, – 1974. – 248 с.

Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – К.: КвиЦ, 2000. – 428 с.

Алексейчев Д.Д., Казаков А.А. Системы автоматического управления в вооружении войск ПВО. Часть 2: Типовые системы автоматического управления радиотехнических устройств. – Х.: ВИРТА ПВО, 1985. – 174 с.

Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман, В.Н. Голиков, И.Н. Бусыгин и др.; Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.

Бартон Д.К., Вард Г.Р. Справочник по радиолокационным измерениям: Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1976. – 392 с.

Алексейчев Д.Д., Казаков А.А. Автоматическое управление и регулирование радиотехнических систем. Часть 2: Анализ и коррекция САУ. – Х.: ВИРТА ПВО, 1982. – 282 с.

Хисматулин В.Ш., Сачук И.И. Многоальтернативная модель движения маневрирующей цели // 36. наук. праць ХВУ. – Х.: ХВУ. – 1998. – Вып. 21. – С. 71 – 75.

Поступила 5.01.2004

ХИСМАТУЛИН Владимир Шайдуллович, канд. техн. наук, профессор кафедры Харьковского военного университета. В 1969 году окончил ВИРТА ПВО. Область научных интересов – радиотехнические следящие системы, оптимальное управление.

КОВАЛЬЧУК Андрей Алексеевич, канд. техн. наук, преподаватель кафедры Харьковского военного университета. В 1997 году окончил Харьковский военный университет. Область научных интересов – радиотехнические следящие системы.

СОСУНОВ Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры Харьковского военного университета. В 1988 году окончил ВИРТА ПВО. Область научных интересов – радиотехнические следящие системы, автоматизация научных исследований.

САЧУК Игорь Иванович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры Харьковского военного университета. В 1996 году окончил Харьковский военный университет. Область научных интересов – радиотехнические следящие системы.