

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ РЛС С ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ИНТЕРВАЛА ВРЕМЕНИ МЕЖДУ РАДИОКОНТАКТАМИ

к.т.н. А.А. Ковальчук, к.т.н. Ю.Э. Парфенов, к.т.н. А.А. Сосунов,
к.т.н. В.Ш. Хисматулин
(представил д.т.н., проф. А.В. Галенко)

В работе на основе двухфазной модели массового обслуживания осуществлена постановка задачи оптимизации пропускной способности многоканальной РЛС с фазированной антенной решеткой. Кратко проанализированы возможные пути решения задачи оптимизации.

Введение. В настоящее время многоканальные РЛС с фазированной антенной решеткой (МК РЛС с ФАР) находят широкое применение в качестве базового элемента радиотехнических следящих систем, которые в свою очередь являются составными частями других сложных систем. В числе достоинств МК РЛС с ФАР важное значение имеет возможность измерения координат нескольких воздушных объектов путем последовательной перестройки луча, т.е. данный тип РЛС является многоканальным за счет временного разделения каналов. В таких РЛС последовательные моменты измерения координат (моменты радиоконтакта) определенного воздушного объекта (ВО) разделяются интервалами времени, длительность которых T можно изменять.

В работах [1, 2] предлагается использовать управление длительностью T интервала времени между радиоконтактами для экономии энергетических и вычислительных ресурсов. Кроме этого, такое управление может быть использовано для повышения радиолокационной скрытности.

Эти предложения могут быть в конкретных условиях эффективны [1, 2]. Однако наиболее существенное содержание управления длительностью интервала времени между радиоконтактами заключено в возможности оптимизации пропускной способности МК РЛС с ФАР за счет гибкого управления количеством целевых каналов.

Физически это можно объяснить следующим образом. Пусть T_1 определяет длительность интервала времени радиоконтакта с ВО с учетом длительности интервала времени, необходимого для перестройки луча.

Тогда при фиксированном T максимальное число сопровождаемых воздушных объектов $N_{\text{макс}}$ МК РЛС с ФАР определится как целая часть отношения длительности интервалов T и T_1

$$N_{\text{макс}} = \text{int}[T/T_1] . \quad (1)$$

При постепенном увеличении длительности интервала времени T , начиная со значения T_1 , в соответствии с формулой (1) увеличивается количество целевых каналов МК РЛС с ФАР и, следовательно, пропускная способность. Однако по мере увеличения длительности интервала времени T между радиоконтактами увеличиваются и ошибки экстраполяции координат, что приводит к повышению вероятности срыва сопровождения [3], т. е. к повторному поиску и захвату ВО на сопровождение. Это неизбежно влечет за собой уменьшение пропускной способности МК РЛС с ФАР. Таким образом, должна существовать такая длительность интервала T , при которой обеспечивается максимальная пропускная способность системы.

Приведенные соображения справедливы, если интенсивность потока целеуказания для МК РЛС с ФАР соизмерима с интенсивностью потока захвата (сопровождения). При низкой интенсивности потока целеуказаний задача управления количеством целевых каналов для достижения максимальной пропускной способности МК РЛС с ФАР смысла не имеет, так как и одноканальная система полностью справляется с входным потоком целеуказаний.

Цель статьи. Целью данной статьи является нахождение общего выражения для показателя качества – пропускной способности МК РЛС с ФАР в виде функционала от параметров системы и длительности интервала времени между радиоконтактами, а также анализ возможных путей его оптимизации.

Содержательное описание задачи. Процесс функционирования МК РЛС с ФАР можно представить в виде сложной двухфазной системы массового обслуживания [4]. Первая фаза этой системы является одноканальной (для простоты без мест ожидания в очереди) и осуществляет поиск и захват ВО на сопровождение (отработку целеуказания). Вторая фаза системы имеет число каналов, определяемое формулой (1), и осуществляет сопровождение воздушных объектов (рис. 1). Если при этом происходит срыв сопровождения ВО, тогда для указанного ВО будет заново начинаться процедура поиска и захвата, при условии, что канал первой фазы свободен. В противном случае ВО теряется. Кроме этого, функционирование двух фаз нельзя рассматривать независимо. Длительность этапа поиска и захвата зависит от количества свободных каналов на второй фазе. При полностью заполненной второй фазе поиск и захват очередного ВО невозможен, и он теряется.

Задача заключается в таком выборе длительности интервала времени T или, что эквивалентно в силу (1), в таком выборе количества кана-

лов второй фазы $N_{\text{макс}}$, при котором пропускная способность двухфазной системы максимальна, т. е. относительное число воздушных объектов, прошедших вторую фазу, максимально.

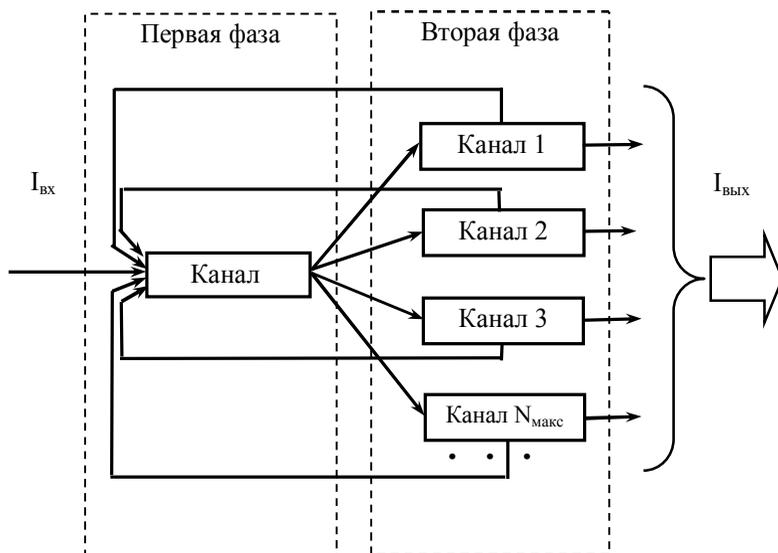


Рис. 1. Структура двухфазной модели МК РЛС с ФАР

Математическая формулировка задачи. Во-первых, необходимо формализовать процесс срыва сопровождения. Для этого очень удобно использовать понятие эквивалентных характеристик дискриминатора [3] (рис. 2). В этой же работе введен показатель – вероятность устойчивого сопровождения p_n . Этот показатель представляет собой вероятность нахождения ошибки экстраполяции к следующему радиоконтакту с ВО в пределах апертуры эквивалентной дискриминационной характеристики дискриминатора. Для стохастической модели движения [5] ВО, а также при адекватности принятой модели движения ВО его реальному движению (при отсутствии систематической ошибки) он может быть рассчитан по формуле [3]:

$$p_n = \Phi\left(\frac{L_x}{2\sqrt{2}\sigma_e}\right), \quad (2)$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция Лапласа; L_x – ширина апертуры эквивалентной дискриминационной характеристики дискриминатора; $\sigma_e^2 = D_e$ – дисперсия ошибки экстраполяции координаты ВО.

В свою очередь ошибки экстраполяции координат ВО зависят как от ошибок единичных наблюдений, характеризуемых дисперсией $D_{и}$,

зависящей от отношения сигнал/шум q [6], и маневренных характеристик ВО, так и от длительности интервала времени T между радиоконтактами (длительности интервала времени прогноза) [7]. Однако при адекватности принятой модели движения ВО его реальному движению ошибка экстраполяции координат не содержит систематической составляющей, и для конкретной координаты (радиальная скорость, дальность, угловые координаты) дисперсия ошибок экстраполяции может быть рассчитана на основе известных методик [2, 8].

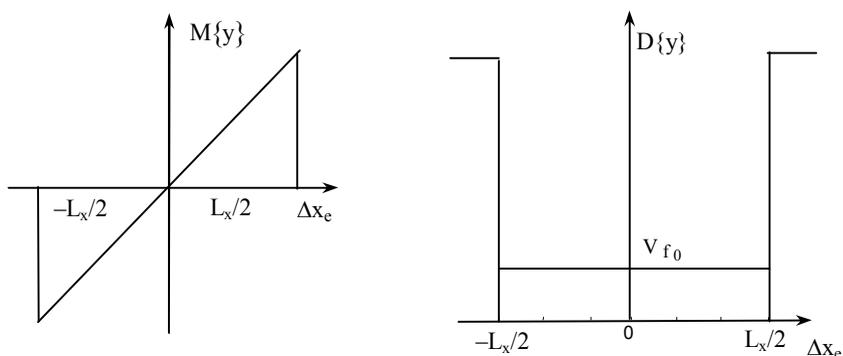


Рис. 2. Эквивалентные дискриминационная и флуктуационная характеристики дискриминатора

Следует отметить, что для различных координат ВО зависимости ошибок экстраполяции от длительности T интервала времени между радиоконтактами носят разный характер [8]. Поэтому при определении p_n необходимо или учитывать вероятность устойчивого сопровождения по всем координатам, или использовать ту зависимость, которая является определяющей.

Определение L_x ширины эквивалентной дискриминационной характеристики дискриминатора представляет собой самостоятельную достаточно сложную задачу, требующую проведения объемного статистического исследования. Главным критерием при подборе зависимости эквивалентного размера апертуры L_x от отношения сигнал/шум q , гарантирующим возможность использования формулы (2) для оценки вероятности отсутствия срыва слежения, должно быть совпадение результатов статистических испытаний на устойчивость сопровождения системы с реальным дискриминатором и аналитических расчетов, выполняемых согласно (2).

В рамках данной статьи возможно указать только основные этапы решения указанной задачи. На первом этапе необходимо подготовить исходные данные для проведения статистического эксперимента: 1) разработать статистическую модель движения ВО, 2) рассчитать статистические характеристики реального дискриминатора, 3) задать структуру и параметры ал-

горитмов оценивания и экстраполяции координат цели. На втором этапе проводится статистический эксперимент по определению зависимости вероятности отсутствия срыва слежения от отношения сигнал/шум q с реальным дискриминатором. На третьем этапе отыскивается аппроксимационная зависимость эквивалентной ширины L_x дискриминационной характеристики дискриминатора от отношения q , дающая по результатам аналитических расчетов согласно (2) те же значения вероятности отсутствия срыва сопровождения, что и система с реальной дискриминационной характеристикой.

Таким образом, выходным результатом решения данной задачи является аппроксимационная зависимость эквивалентной ширины L_x дискриминационной характеристики дискриминатора от отношения сигнал/шум q .

При постоянном значении p_n (после завершения поиска и захвата ВО) дискретный характер радиоконтакта с ВО приводит к дискретному геометрическому распределению вероятности срыва сопровождения (вероятности выхода ошибки экстраполяции за пределы апертуры эквивалентной характеристики дискриминатора):

$$p_{cp}(n) = p_n^{n-1} \cdot (1 - p_n),$$

где n – номер радиоконтакта с ВО; $p_{cp}(n)$ – вероятность срыва сопровождения при n -м радиоконтакте с ВО.

При предельном переходе к непрерывному распределению ему соответствует показательное распределение интервала времени до срыва сопровождения. Среднее количество радиоконтактов до срыва сопровождения $n_{\bar{a}}$ при геометрическом распределении определяется по формуле

$$n_{\bar{a}} = 1/(1 - p_i).$$

При переходе к непрерывному показательному распределению интенсивность срыва сопровождения μ_0 определится следующим образом:

$$\mu_0 = (1 - p_i) / T = 1/\bar{t}_{\bar{a}0}, \quad (3)$$

где T – длительность интервала времени между радиоконтактами с ВО; \bar{t}_{cp} – среднее время до срыва сопровождения.

Таким образом, длительность интервала времени t_{cp} до срыва сопровождения ВО имеет показательное распределение $L_{t_{cp}}$ с параметром распределения μ_0 , определяемым согласно (3). В силу того, что и сам показатель p_n является функцией T , следовательно, параметр распределения μ_0 определяется, в конечном итоге, длительностью интервала T (при прочих равных условиях).

Во-вторых, формализуем процесс поиска и захвата ВО на сопровождение (отработки целеуказания). Длительность $t_{пз}$ этого этапа носит случайный характер. Среднее значение $\bar{t}_{пз}$ длительности интервала вре-

мени поиска и захвата зависит как от точности данных целеуказания, так и от числа сопровождаемых целей, а точнее от разности между максимально возможным количеством каналов на этапе сопровождения $N_{\text{макс}}$, определяемым формулой (1), и реальным количеством сопровождаемых ВО, т. е. от количества свободных каналов второй фазы. Среднее значение $\bar{t}_{\text{пз}}$ максимально, если указанная разность равна единице.

Таким образом, длительность интервала времени $t_{\text{пз}}$ поиска и захвата ВО на сопровождение имеет случайное распределение $L_{t_{\text{пз}}}$, причем его среднее значение $\bar{t}_{\text{пз}}$ увеличивается с уменьшением количества свободных каналов второй фазы. При полностью заполненной второй фазе поиск и захват очередного ВО невозможен.

Длительность процесса сопровождения ВО также носит случайный характер. Поэтому будем считать, что длительность интервала времени $t_{\text{соп}}$ сопровождения ВО имеет случайное распределение $L_{t_{\text{соп}}}$, причем его среднее значение $\bar{t}_{\text{соп}}$ постоянно.

Для входного потока целеуказаний примем случайное распределение $L_{t_{\text{цу}}}$ интервалов времени $t_{\text{цу}}$ между целеуказаниями, однако, с постоянным средним значением $\bar{t}_{\text{цу}}$ (стационарный поток целеуказаний).

Обозначим через $I_{\text{вых}}$ среднее количество воздушных объектов в единицу времени (интенсивность), прошедших этап сопровождения, через $I_{\text{вх}}$ среднее количество воздушных объектов в единицу времени, поступающих на вход двухфазной системы, а через R их отношение

$$R = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}}.$$

В этом случае искомый показатель R представляет собой некоторый функционал F от распределений случайных величин $L_{t_{\text{цу}}}$, $L_{t_{\text{пз}}}$, $L_{t_{\text{ср}}}$, $L_{t_{\text{соп}}}$, а также от параметров T , T_1 , q :

$$R = F(L_{t_{\text{цу}}}, L_{t_{\text{пз}}}, L_{t_{\text{ср}}}, L_{t_{\text{соп}}}, T, T_1, q). \quad (4)$$

Тогда задача оптимизации пропускной способности многоканальной РЛС с ФАР запишется следующим образом

$$R = F(L_{t_{\text{цу}}}, L_{t_{\text{пз}}}, L_{t_{\text{ср}}}, L_{t_{\text{соп}}}, T, T_1, q) \rightarrow \max_T. \quad (5)$$

Анализ возможных путей решения задачи оптимизации. Самый простой случай соответствует экспоненциальным законам распределения случайных величин $t_{\text{цу}}$, $t_{\text{пз}}$ и $t_{\text{соп}}$ ($t_{\text{ср}}$ имеет такое распределение согласно математической формулировке задачи). В этом случае двухфазная модель

массового обслуживания является марковской с дискретным пространством состояний. По графу переходов между состояниями легко записывается система дифференциальных уравнений для скоростей изменения вероятностей состояний. Показатель R может быть рассчитан через финальные вероятности состояний и решение задачи может быть получено путем, хотя несколько громоздких, но стандартных вычислений [9, 10].

В случае, если хотя бы одна из случайных величин $t_{\text{цп}}$, $t_{\text{пз}}$, $t_{\text{соп}}$ не обладает таким распределением, нахождение аналитического решения проблематично. В этом случае разумной альтернативой является имитационное моделирование на ЭВМ. Однако при этом необходимо будет построить марковский случайный процесс с пространством состояний мощности континуума. Показатель R (4), подлежащий максимизации, должен быть средним значением некоторой функции от пространства состояний такого процесса. Для получения математически корректных результатов следует найти последовательность моментов регенерации [11] указанного случайного процесса и воспользоваться известными оценками [12].

Если распределения случайных величин $t_{\text{цп}}$, $t_{\text{пз}}$, $t_{\text{соп}}$ такие, что состояние, соответствующее пустой двухфазной системе, является возвратным, тогда последовательность моментов регенерации определяется последовательными моментами поступления целеуказаний в пустую систему. В противном случае можно попытаться найти последовательность моментов регенерации, пользуясь схемой расщепления [13]. Но может случиться, что множество состояний вышеуказанного случайного процесса не окажется неприводимым, и применение схемы расщепления будет невозможным. Тогда потребуются введение дополнительных условий (гипотез), что, однако, выходит за рамки данной статьи.

Выводы. Наиболее существенное содержание управления длительностью интервала времени между радиоконтактами с ВО заключено в возможности оптимизации пропускной способности МК РЛС с ФАР за счет гибкого управления количеством целевых каналов.

На основе двухфазной модели массового обслуживания в работе осуществлена постановка задачи оптимизации пропускной способности МК РЛС с ФАР в виде выбора такой длительности интервала времени T между радиоконтактами с ВО, при которой количество воздушных объектов, прошедших этап сопровождения в единицу времени, нормированное на количество целеуказаний, поступающих в единицу времени в систему, максимально (5). Кроме этого, кратко обсуждены возможные пути решения задачи оптимизации. Для частного случая марковской двухфазной модели возможно получение аналитических результатов, а в общем случае разумной альтернативой является имитационное моделирование на

ЭВМ. При этом основная сложность возникнет при нахождении последовательности моментов регенерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хисматулин В.Ш., Сачук И.И., Ковальчук А.А. Организация слежения за аэродинамической целью с достаточной точностью // Вестник ХГПУ. – Х.: ХГПУ. – 2000. – Вып. 125. – С. 13 – 17.
2. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. – К.: КвиЦ, 2000. – 428 с.
3. Хисматулин В.Ш., Сачук И.И., Ковальчук А.А. Оценка вероятности надежного сопровождения аэродинамических целей многоканальной радиолокационной станцией // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: ГАЭУ «ХАИ». – 2001. – Вып. 22. – С. 259 – 262.
4. Кулинич И.А., Парфенов Ю.Э., Соснов А.А. Модель для обоснования требований к показателю качества радиотехнической следящей системы // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ. – 2003. – Вып. 5. – С. 145 – 150.
5. Зингер Р.А. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью // Зарубежная радиоэлектроника. – 1971. – № 8. – С. 40 – 57.
6. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
7. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: Пер. с англ. – М.: Связь, 1976. – 495 с.
8. Хисматулин В.Ш. О рациональном выборе рекуррентного алгоритма для оценки состояния движущегося объекта // Сб. реф. ВИМИ, сер. “МФ”, вып. 05, № Д06578 // – М., 1985.
9. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
10. Венциель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1991. – 384 с.
11. Иглхарт Д.Л., Шедлер Д.С. Регенеративное моделирование сетей массового обслуживания: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1984. – 136 с.
12. Крейн М., Лемуан О. Введение в регенеративный метод анализа моделей. – М.: Наука, 1982. – 104 с.
13. Нуммелин Э. Общие неприводимые цепи Маркова и неотрицательные операторы. – М.: Мир, 1989. – 207 с.

Поступила 17.10.2003

КОВАЛЬЧУК Андрей Алексеевич, канд. техн. наук, преподаватель кафедры ХВУ. В 1997 году окончил ХВУ. Область научных интересов – радиотехнические следящие системы.

ПАРФЕНОВ Юрий Эдуардович, канд. техн. наук, начальник лаборатории Научно-го центра Войск ПВО. В 1993 году окончил ВИРТА ПВО. Область научных интересов – автоматизированные системы управления, автоматизация научных исследований.

СОСУНОВ Александр Алексеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры ХВУ. В 1988 году окончил Московский физико-технический институт. Область научных интересов – радиотехнические следящие системы, автоматизация научных исследований.

ХИСМАТУЛИН Владимир Шайдуллович, канд. техн. наук, профессор кафедры ХВУ. В 1969 году окончил ВИРТА ПВО. Область научных интересов – радиотехнические следящие системы.