

Алгоритм сопровождения маневрирующих целей с учетом данных первичной обработки сигнала

77-30569/293090

01, январь 2012

Логвинов М. А., Буров А. С., Барцевич С. Н.

УДК 621396.6

НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана

logvinovm@mail.ru

burovac@bmstu.ru

snb@bmstu.ru

Вопросам синтеза измерителей координат интенсивно маневрирующих целей уделяется в настоящее время достаточно много внимания. Эта задача решается в рамках теории калмановской фильтрации с использованием двух подходов[1, 3]:

а) - ускорение цели считается случайным процессом и оценивается статистическими методами;

б) - ускорение цели считается детерминированным процессом и оценивается в реальном времени по результатам наблюдения.

При этом вектор состояния цели расширяется и дополняется составляющими, описывающими ускорение цели по соответствующим координатам.

Необходимость оценки ускорения приводит к адаптивным алгоритмам фильтрации маневрирующих целей с обнаружителем маневра. При этом возможно два метода реализации фильтра с обнаружителем маневра (рисунок 1) [1]. Это:

а) - переключение фильтров, один из которых настроен на сопровождение не маневрирующей цели, а другой – на сопровождение маневрирующей, по результатам обнаружения маневра (рис. 1а);

б) - при обнаружении маневра уравнение состояния дополняется составляющими, обусловленными маневром цели (рис. 1б).

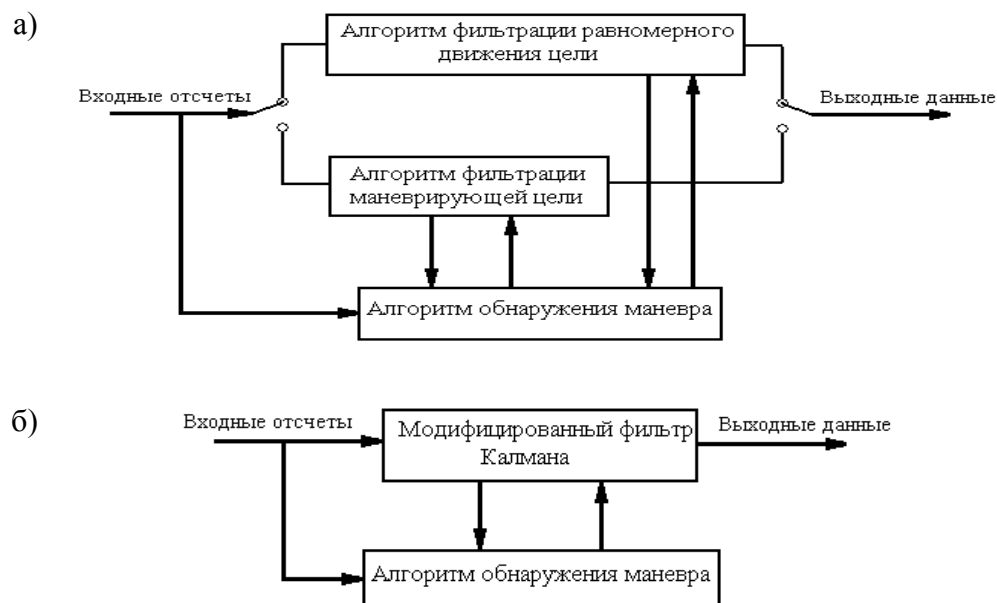


Рисунок 1 – Структурные схемы адаптивных алгоритмов фильтрации маневрирующих целей

В рассматриваемых подходах принципиальное значение имеет задача обнаружения начала и конца маневра. Для ее решения могут применяться как параметрические, так и непараметрические методы, причем для обнаружения маневра наиболее часто используется такой параметр, как невязка, статистические характеристики которой при наличии маневра изменяются.

Особенностью алгоритмов обнаружения маневра на основе анализа невязки является запаздывание в принятии решения, что объясняется случайным характером формируемой статистики. Его значение составляет в среднем 3 – 5 интервалов обращения к цели. При цикле обзора порядка 3 с запаздывание может составлять 9 – 15 с. При интенсивных маневрах это может привести к срыву сопровождения. Для того чтобы это не происходило, необходимы более эффективные методы обнаружения маневра, которые могут быть основаны на анализе данных, получаемых при первичной обработке. Такие алгоритмы и анализируются в данной работе.

В основе алгоритма оценивания ускорения на этапе первичной обработки лежит следующее. В [6] показано, что сигнал, отраженный от цели, летящей равномерно, имеет ширину спектра порядка 10-15 Гц. Т.е. допустимое время когерентного накопления лежит в пределах 60-100 мс.

При таких временах когерентной обработки маневр цели приводит к расширению спектра отраженного сигнала. Оценив расширение спектра, получаем возможность оценить

радиальное ускорение цели и использовать эту информацию в алгоритмах вторичной обработки.

Рассмотрим связь между ускорением цели и шириной спектра сигнала.

При наличии ускорения изменение относительного расстояния «носитель БРЛС – цель» может быть описано следующим выражением:

$$D(t) = D_0 - (V_{cp} + V_{up})t + \frac{(a_{cp} + a_{up})}{2}t^2 + \frac{(V_{cm} - V_{um})^2}{2D_0}t^2, \quad (1)$$

где:

$$V_{cp} = V_c \cos \alpha_u, \quad V_{up} = V_u \cos \alpha_c, \quad V_{cm} = V_c \sin \alpha_u,$$

$V_{um} = V_u \sin \alpha_c$ - соответственно радиальные и тангенциальные составляющие скорости носителя БРЛС и цели, м/с;

a_{cp} и a_{up} - радиальные составляющие ускорения носителя и цели, м/с²;

α_u - угол визирования цели со стороны носителя БРЛС;

α_c - угол визирования носителя БРЛС со стороны цели;

D_0 - начальное расстояние между носителем БРЛС и целью, м.

В соответствии с (1) закон изменения частоты принимаемого сигнала:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = -\frac{2}{\lambda} (V_{cp} + V_{up}) + 2 \frac{(a_{cp} + a_{up})}{\lambda} t + 2 \frac{(V_{cm} - V_{um})^2}{\lambda D_0} t.$$

Первая компонента в этом выражении определяет доплеровское смещение частоты принимаемого сигнала f_d , вторая компонента характеризует изменение частоты в зависимости от радиальных параметров сближения, а третья – от тангенциальных.

Таким образом можно полагать, что сигнал, отраженный от маневрирующей точечной цели, имеет в рассматриваемом приближении квадратичный закон изменения фазы, т.е он близок к ЛЧМ. Спектр такого сигнала приближается к прямоугольному.

Ширину спектра сигнала Δ за счет маневра цели можно оценить выражением:

$$\Delta = \frac{2 a_{сбл}}{\lambda} T,$$

где приняты следующие обозначения:

$a_{сбл} = a_{cp} + a_{up}$ - ускорение сближения воздушной цели и самолета-носителя РЛС, м/с²;

T – интервал когерентного накопления, с.

Для наглядности значения параметра Δ для разных значений ускорения сближения (а) и времени когерентного накопления (T) для $\lambda = 4$ см приведены в таблице 1.

T,мс a, м/с²	12,5	25	50	100	200
5	3,1	6,3	12,5	25	50
10	6,3	12,5	25	50	100
15	9,4	18,8	37,5	75	150
20	12,5	25	50	100	200
30	18,8	37,5	75	150	300
40	25	50	100	200	400
50	31,3	62,5	125	250	500

Таблица 1 - Зависимость ширины спектра сигнала, отраженного от воздушной цели, от длительности когерентного накопления и ускорения сближения носителя с целью

Анализ данных, представленных в таблице, показывает следующее:

а) - при малых интервалах когерентного накопления расширение спектра за счет маневрирования цели незначительно, оно существенно меньше полосы доплеровского фильтра;

б) - с увеличением времени когерентного накопления уже до 25 мс при маневре цели с ускорением сближения 3-4 g, расширение спектра таково, что занимает более двух смежных частотных фильтров;

в) - если же рассмотреть характерные для перспективных БРЛС интервалы накопления 50..100 мс, то ускорения порядка 1 g заметно влияют на выходной сигнал первичной системы обработки, а при ускорении до 5 g спектральная отметка от воздушной цели становится протяженной по частоте.

Рассмотрим возможность фиксации момента начала маневрирования по спектральным характеристикам принимаемого сигнала, для чего оценим возможную форму спектра сигнала, отраженного от сложной цели.

Комплексную огибающую сигнала, отраженного от сложной цели, представим в виде:

$$y(k) = \sum_i \dot{U}_i(k) T_i(k) \exp(j\omega t + bt^2 / 2),$$

где приняты следующие обозначения:

i – индекс суммирования по всем существенным блестящим точкам;

$\dot{U}_i(k)$ - комплексная огибающая сигнала, формируемого i-той блестящей точкой в момент времени k , в значении которой учитываются случайные начальные фазы сигналов и начальные изменения доплеровского сдвига частоты;

$T_i(k)$ - множитель, характеризующий интервал времени, в котором существуют отражения, обусловленные i -той блестящей точкой.

Наличие нескольких блестящих точек приводит к изменениям спектра. На рисунке 2 представлен расчетный спектр сигнала, отраженного от маневрирующей цели, где цель представляется виде двух блестящих точек, а сигналы, отраженные от отдельных блестящих точек одинаковы по всем параметрам, кроме начальной фазы. Сдвиг фаз между сигналами блестящих точек - $\pi/3$. На рисунке 3 представлен спектр сигнала, отраженного от маневрирующей цели, где цель представляется в виде двух блестящих точек, а сигналы, отраженные от отдельных блестящих точек одинаковы по всем параметрам, кроме доплеровского сдвига частоты. Разность доплеровских частот между сигналами блестящих точек – 20 Гц.

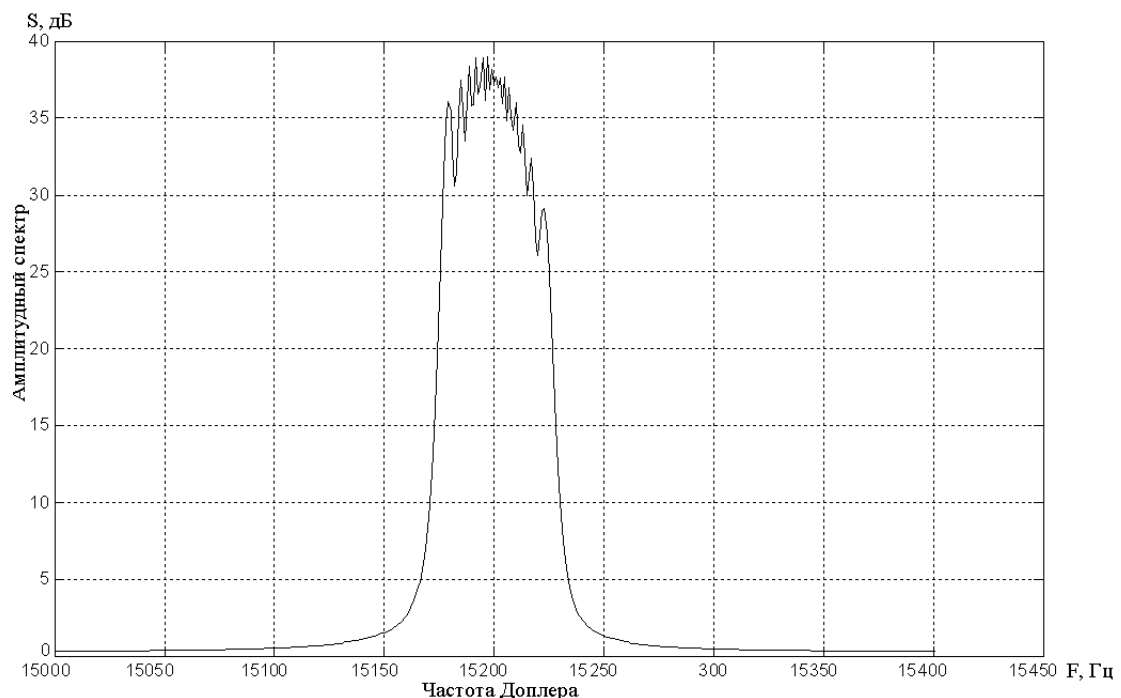


Рисунок 2- Спектр сигнала, отраженного от маневрирующей цели
(сдвиг фаз между сигналами блестящих точек - $\pi/3$)

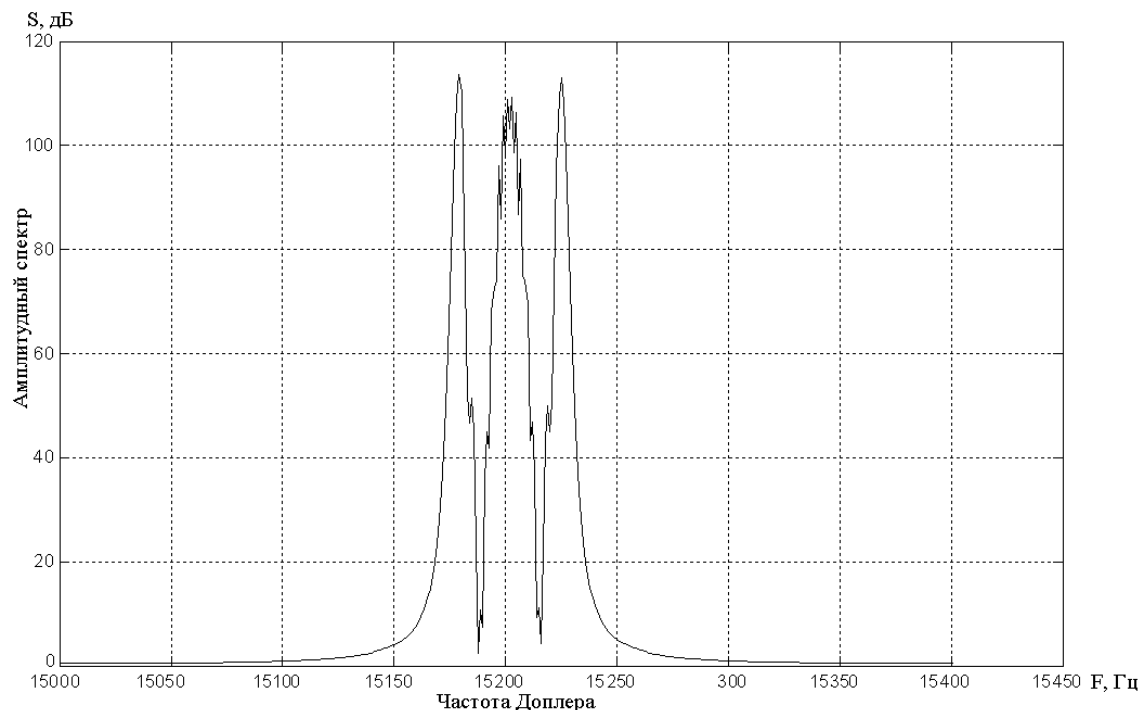


Рисунок 3 - Спектр сигнала, отраженного от маневрирующей цели
(разность доплеровских частот между сигналами блестящих точек – 20 Гц)

Таким образом, форма спектра может изменяться достаточно сильно, тогда как такой параметр, как ширина спектра, остается практически постоянным.

Реакция приемника на такой сигнал зависит от соотношения между временем анализа T и интервалом времени когерентной обработки ($T_1 = 1/\Delta f$, где Δf – полоса пропускания доплеровского фильтра), а также от отклонения частоты сигнала от центральной частоты настройки доплеровского фильтра. В частности, если цель не маневрирует, а $T = T_1$, то оценка ширины спектра сигнала рассматриваемым методом может лежать в пределах Δf (при совпадении средней частоты отраженного сигнала с частотой настройки доплеровского фильтра) до $2\Delta f$ (при расстройке на половину полосы пропускания). Т.е. ошибка оценивания ширины спектра может составлять Δf .

Аналогично ширина спектра сигнала, отраженного от маневрирующей цели, может быть оценена в соответствии с выражением:

$$\Delta \hat{F} = N_f \Delta f_d,$$

где приняты следующие обозначения:

Δf_d - величина, соответствующая разности между частотами настройки двух соседних фильтров;

N_f - количество фильтров, на которые «рассыпается» принимаемый сигнал. Этот параметр и характеризует ускорение цели.

Параметр N_f может быть оценен по результатам сравнения сигналов в каналах, соответствующих цели, с порогом.

Рассмотрим вопросы выбора порога и точности оценивания ширины спектра сигнала. Будем предполагать, что за счет маневра энергия сигнала равномерно делится по N_ϕ фильтрам. Амплитуда отсчета в каждом доплеровском фильтре, в котором присутствует сигнал, распределена по закону Релея [4]:

$$W(x) = \frac{x}{\sigma_0^2(1 + q_0 / N_f)} \exp\left[-x^2 / 2\sigma_0^2(1 + q_0 / N_f)\right],$$

где σ_0^2 - дисперсия собственного шума на выходе доплеровского фильтра; q_0 - отношение сигнал-шум для неманеврирующей цели.

Оценка ширины спектра, как отмечалось выше, формируется по результатам сравнения выходных сигналов анализатора спектра с пороговым значением.

Анализ показывает, что уровень порога должен выбираться таким образом, чтобы вероятность его превышения за счет собственного шума не превышала 10^{-3} .

Влияние флуктуаций амплитуды на качество оценивания ширины спектра рассмотрим на следующем примере. Предположим, что ширина спектра входного сигнала ΔF , а спектральная плотность сигнала в этой полосе равномерна. Ширина спектра оценивается в соответствии со следующим алгоритмом: амплитуды отсчетов, лежащих в полосе сигнала (области связности), сравниваются с порогом измерения; вычисляется количество фильтров N_f , лежащих в полосе сигнала и включающих «крайние» фильтры, в которых было зафиксировано превышение порога; вычисляется оценка ширины спектра сигнала $\Delta \hat{F} = N_f \Delta f_d$ и текущего ускорения цели $\hat{a}_y = \frac{\lambda}{2} N_f$.

Общая структура алгоритма приведена на рисунке 4.

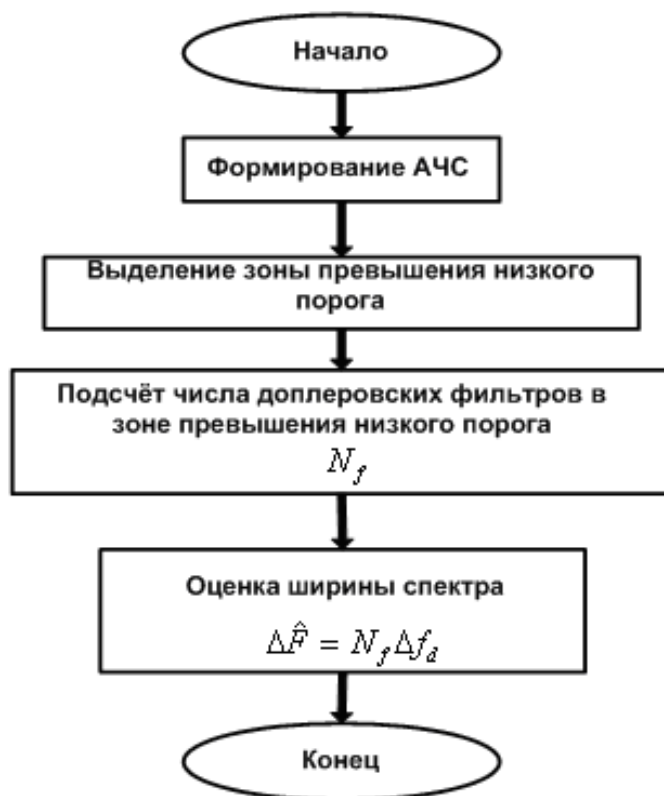


Рисунок 4 - Алгоритм оценивания ширины спектра сигнала

Поскольку амплитуды сигнала случайны, событие, заключающееся в превышении порога в элементе разрешения, также случайно. Рассмотрим, как влияют параметры алгоритма на результирующую оценку.

Для этого воспользуемся следующей моделью: полоса пропускания доплеровского фильтра Δf_d , спектральная плотность сигнала равномерна в полосе ΔF , вероятность превышения порога измерения – P ; отношение сигнал/шум в элементе разрешения q_1 много больше 1, причем, поскольку мощность сигнала, отраженного от цели, постоянна, то $q_1 = q_0 / N_\phi$, где q_0 – отношение сигнал/шум до начала маневрирования. Тогда положение, соответствующее «началу» сигнала, будет определено правильно с вероятностью P . С вероятностью $(1 - P) \cdot P$ ошибка в определении «начала» сигнала будет составлять один элемент разрешения, с вероятностью $(1 - P)^m \cdot P$ – m элементов разрешения, а средняя ошибка N_{cp} будет равна:

$$N_{cp} = \frac{N(1 - P)^N + \sum_{i=1}^{N-1} i(i + 1)(1 - P)^i P^{N-i}}{(1 - P)^N + \sum_{i=0}^{N-1} (i + 1)(1 - P)^i P^{N-i}},$$

где N_f – количество фильтров лежащих в полосе отраженного сигнала.

График зависимости $N_{\text{ср}}$ от вероятности превышения порога измерения P представлен на рисунке 5.

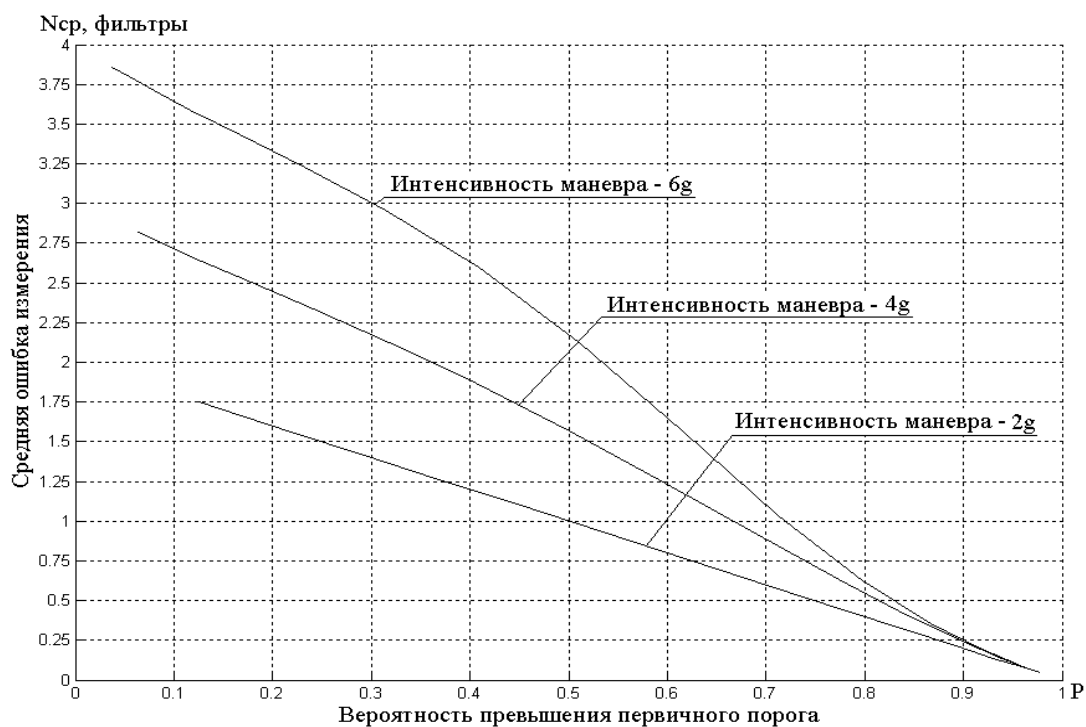


Рисунок 5 - Зависимость средней ошибки измерения от вероятности превышения первичного порога

Из графика следует, что при вероятности превышения порога измерения 0.5 - 0.8 (в зависимости от интенсивности маневра), средняя погрешность оценки ускорения не превышает величины, соответствующей полосе пропускания одного фильтра.

Учитывая зависимость между вероятностью превышения порога измерения и дальностью до объекта, получен график (рисунок 6) зависимости средней ошибки оценивания ускорения от дальности до цели.

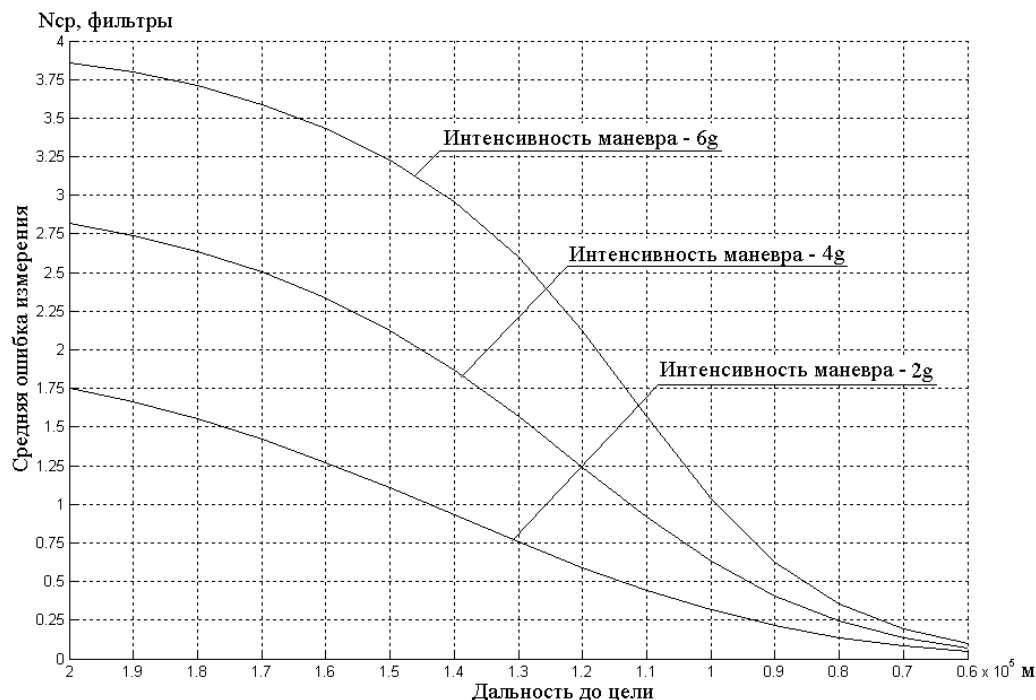


Рисунок 6 - Зависимость средней ошибки оценивания ускорения от дальности до цели

Эффективность предложенных алгоритмов оценивалась методом математического моделирования. Были разработаны модели:

а) - кинематического звена, включающего носитель и маневрирующую цель; б) – устройства обработки, включающего алгоритмы доплеровской фильтрации и вторичной обработки радиолокационной информации с обнаружением маневра по данным первичной обработки.

Анализировалось поведение доплеровских траекторий, представляемых в координатах «время-доплеровский сдвиг частоты».

Основные параметры модели:

- а) - цель движется встречным курсом со скоростью 250 м/с;
- б) - собственная скорость носителя – 250 м/с;
- в) - угол между векторами собственной скорости и скорости цели - 5° ;
- г) - азимут цели - 6° ;
- д) - угол места 3° ;
- е) - начальная дальность до цели - 184 км; на дальности 184 км отношение сигнал/(собственный шум) $q=6$ дБ;
- ж) - на дальности 80 км цель совершает маневр (Маневр – петля);
- з) - в конце интервала наблюдения дальность равна 57.066 км ($q=15$ дБ).

Основные параметры БРЛС:

- а) - обзор регулярный, цикл обзора – 2,8 с;

- б) - интервал наблюдения – 80 циклов обзора;
- в) - время когерентного накопления $T_{\text{нак}} = 30$ мс;
- г) - количество элементов разрешения по угловым координатам в зоне ответственности - 93 (31x3);
- д) - полоса пропускания доплеровского фильтра – 33,3 Гц;
- е) - вероятность превышения первичного порога шумовым сигналом - 10^{-3} на канал дальности, то есть 0,011 для элемента разрешения по частоте.

На рисунке 7 представлены зависимости изменения скорости цели и ее ускорения при маневре.

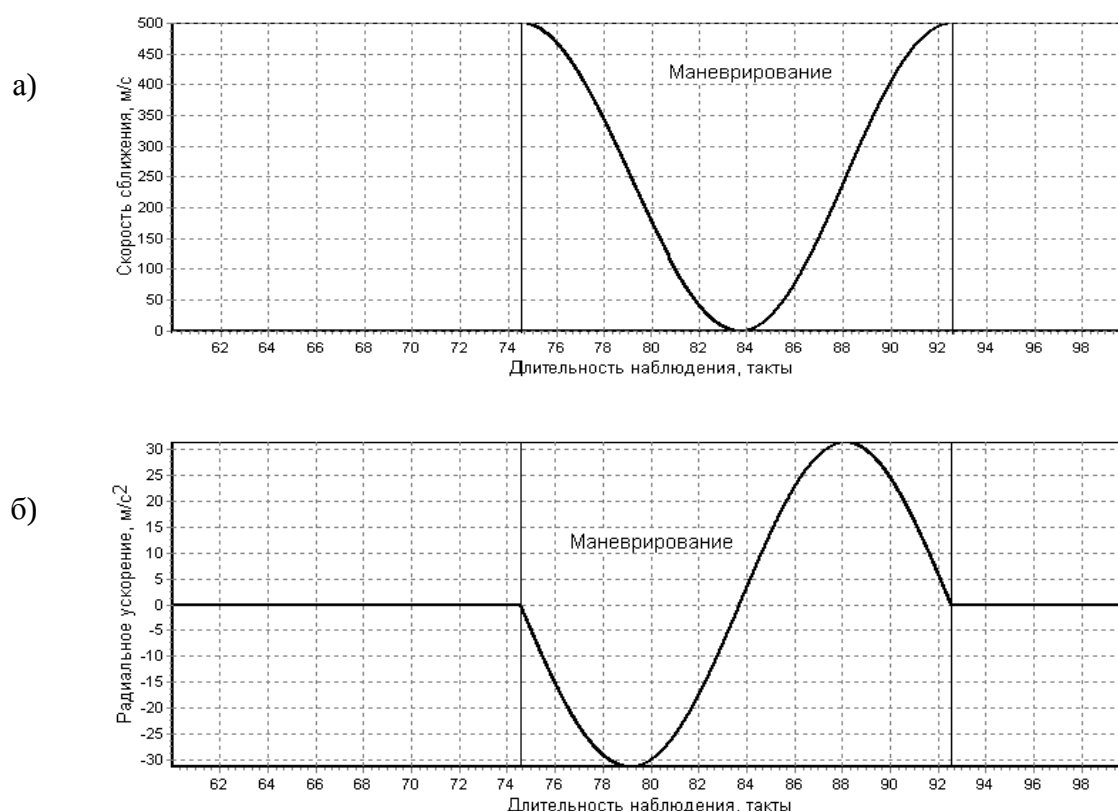


Рисунок 7 - Изменение радиальной скорости (а) и ускорения (б) при маневре цели

На рисунке 8 показаны вероятности обнаружения начала и конца маневра цели при использовании предлагаемого алгоритма (далее «Алгоритм №1»), использующего информацию об ускорении цели, полученную на этапе первичной обработки, и классического алгоритма («Алгоритм №2»). На рисунке по оси абсцисс отложены значения длительности наблюдения в тактах, а по оси ординат – значения вероятности правильного обнаружения.

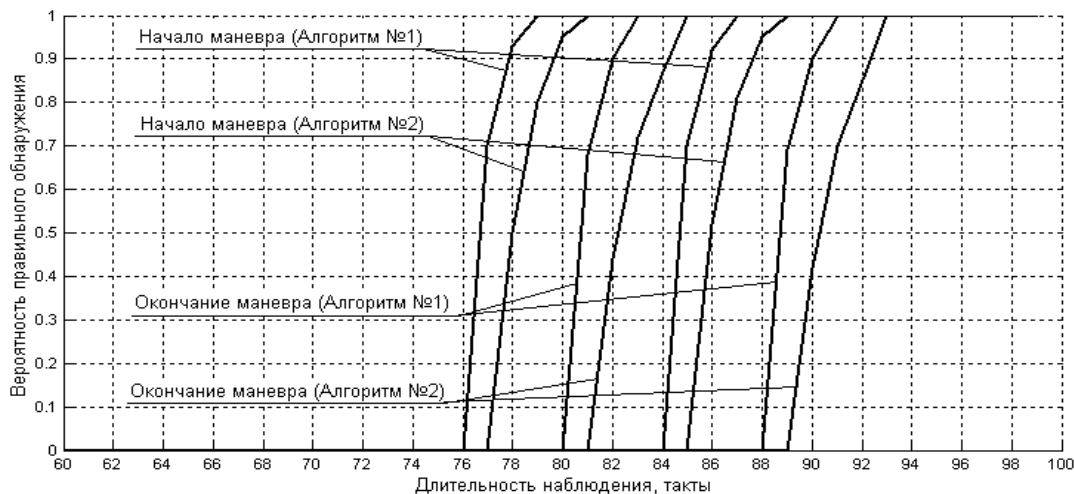


Рисунок 8 - Вероятности правильного обнаружения начала и конца маневра предлагаемым и стандартным алгоритмами

Из графиков видно, что предложенный алгоритм позволяет с меньшими временными потерями принять решение о маневре: выигрыш во времени принятия решения порядка 2-х тактов зондирования (около 6 с). Небольшой выигрыш объясняется тем, что при маневре «петля» происходит плавное изменение ускорения от нуля до максимального значения.

На рисунке 9 показана зависимость ошибки сопровождения маневрирующей цели от длительности наблюдения.

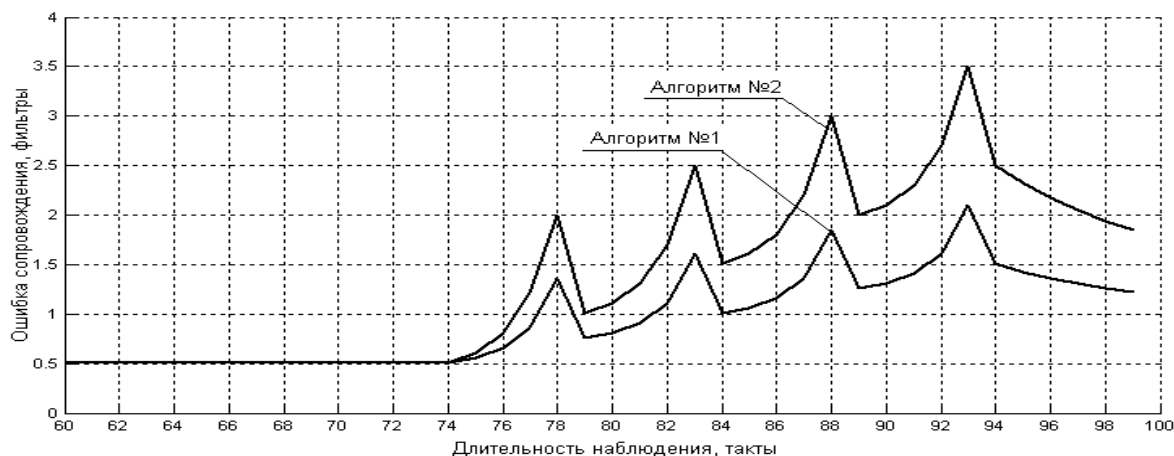


Рисунок 9- Зависимость ошибки сопровождения маневрирующей цели от длительности наблюдения

Верхний график соответствует классическому алгоритму, нижний график - предлагаемому алгоритму с использованием информации об ускорении, полученной на этапе первичной обработки. При маневре цели ее динамические параметры отличаются от параметров, заложенных в алгоритм фильтрации. Поэтому ошибка сопровождения растет. Далее происходит обнаружение начала маневра и коррекция фазовых координат цели с

учетом оценки ускорения (характерный провал на графике). При этом алгоритм №1 позволяет более точно и раньше оценить ускорение цели, поэтому коррекция фазовых координат происходит с большей точностью чем у стандартного алгоритма. После обнаружения маневра параметры модели в обоих алгоритмах изменяются: в модель фильтрации включается новый параметр - ускорение цели. Но в классическом алгоритме (алгоритм №2) ускорение оценивается по изменению скорости сближения. А в предлагаемом алгоритме ускорение является также и измеряемым параметром. Поэтому рост ошибки сопровождения, связанный с несоответствием модели движения цели ее реальному движению, при использовании алгоритма №1, заметно меньше.

Анализ данных показывает, что за счет более раннего обнаружения маневра цели предлагаемый алгоритм вторичной обработки позволяет существенно (в 1,6 раза) уменьшить ошибку сопровождения маневрирующей цели по частоте.

Таким образом, использование информации о расширении спектра сигнала, отраженного от цели, получаемой на этапе первичной обработки сигнала, позволяет существенно уменьшить ошибки сопровождения цели при ее маневре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев, 2000. 428 с.
2. Информационные технологии в радиотехнических системах: Учебное пособие./ Под ред. И.Б. Федорова.М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2003. 671 с.
3. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. - М. : Радио и связь, 1993. 320 с.
4. Акимов П.С., Бакут П.А., Богданович В.А. Теория обнаружения сигналов. Под ред. Бакута П.А. – М.: Радио и связь, 1984 г.
5. Перунов Ю.М., Фомичев К.И., Юдин Л.М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием. Москва, «Радиотехника», 2003. 415 с.
6. Черных М.М., Богданов А.В., Буров А.С. и др. Анализ информационных свойств когерентных радиолокационных сигналов//Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер «Приборостроение». 1999 г. №4. 16 -26 с.

Algorithm of maintainability of maneuvering targets with account taken of signal preprocessing

77-30569/293090

01, January 2012

Logvinov M.A., Burov A.S., Barceovich S.N.

Bauman Moscow State Technical University

logvinovm@mail.ru

burovac@bmstu.ru

snb@bmstu.ru

The authors present an algorithm of maneuvering targets maintainability; the algorithm uses signal preprocessing data of radar-tracking information for detection of the beginning and the end of the maneuver. Information about the beginning and the end of the maneuver consists in changing the spectrum width of the received signal. The authors propose an algorithm for estimation of spectrum width of the maneuvering target, and study its characteristics. The authors draw a comparison of characteristics of the offered algorithm with a well-known algorithm which uses information about discrepancy between measured and filtered parameters for maneuver detection. Simulation results characterizing efficiency of algorithm are presented. Research methods are: mathematical synthesis and mathematical simulation. Application domain – pulse-Doppler radar stations.

Publications with keywords: [maneuver](#), [spectrum](#), [filtering](#)

Publications with words: [maneuver](#), [spectrum](#), [filtering](#)

Reference

1. Kuz'min S.Z., Digital radiolocation. Introduction to the Theory, Kiev, 2000, 428 p.
2. In: I.B. Fedorov (Ed.), Information technology in radiotechnical systems, Moscow, Izd-vo MGTU im N.E. Baumana - BMSTU Press, 2003, 671 p.
3. Farina A., Studer F., Digital processing of radiolocation information. Tracking of the targets of, Moscow, Radio i sviaz', 1993, 320 p.
4. Akimov P.S., Bakut P.A., Bogdanovich V.A., in: P.A. Bakuta (Ed.), The theory of signal detection, Moscow, Radio i sviaz', 1984.

5. Perunov Iu.M., Fomichev K.I., Iudin L.M, Radio electronic suppression of information channels weapon control systems, Moscow, Radiotekhnika, 2003, 415 p.
6. Chernykh M.M., Bogdanov A.V., Burov A.S., et al., Analysis of the information properties of coherent radiolocation signals, Vestnik MGTU im. N.E.Baumana. Ser. Priborostroenie - Bulletin of BMSTU. Ser. Instrument making 4 (1999) 16 -26.