

Оценки границ устойчивости алгоритмов фильтров первого порядка при наличии в измерениях дальности ЛЧМ-сигналом скоростной ошибки

М.А. Трофименко^{1,2}, В.Е. Фарбер^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

² ПАО «Радиофизика»

При разработке систем обработки радиолокационной информации по данным РЛС, использующих зондирующие сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), необходимо учитывать наличие скоростной ошибки ΔR_n^v . При использовании схемы подстройки (гетеродинирования) частоты скоростная ошибка ΔR_n^v равна

$$\Delta R_n^v = k_v \{v_R(t_n) - v_R^{on}(t_n)\}, \quad k_v = \tau_{zc} F / \Delta F,$$

где $v_R(t_n)$ – радиальная скорость космического объекта (КО); $v_R^{on}(t_n)$ – опорная скорость, соответствующая опорному значению частоты; τ_{zc} – длительность зондирующего сигнала; F – несущая частота; ΔF – частотная девиация ЛЧМ-сигнала; k_v – коэффициент скоростного смещения.

В реальных условиях значение $v_R(t_n)$ точно не известно и в качестве $v_R^{on}(t_n)$ приходится использовать значение $v_R(t_n)$, получаемое в процессе оценки параметров движения КО, в результате чего ΔR_n^v в общем случае отлична от нуля.

В [1, 2] проведено аналитическое исследование влияния наличия ΔR_n^v на границы устойчивости алгоритмов определения параметров движения входящих в атмосферу КО. На внеатмосферном участке полета рассматривались алгоритмы, построенные на основе фильтров первого порядка, где под порядком фильтра понимается степень полинома, в соответствии с которым изменяется фильтруемый параметр. И в том и в другом случае рассматривались алгоритмы, построенные на основе фильтров с постоянными параметрами сглаживания (фильтров с эффективной конечной памятью – ЭКП).

Настоящая работа посвящена исследованию влияния наличия ΔR_n^v на границы устойчивости алгоритмов фильтров первого порядка. Для фильтров с переменными параметрами сглаживания (фильтров Калмана и диффузионных фильтров) исследование проводилось методами расчетов на ЦВМ. Кроме того, расчеты на ЦВМ проводились и для фильтров с ЭКП для оценки их соответствия аналитически полученным в [1] данным.

Оценка границ устойчивости определялась на основе анализа переходного процесса на выходе фильтра, т.е. анализировалась реакция фильтра на дискретную единичную функцию

$$\tilde{r}(t_1) = \tilde{r}(t_2) = 0, \quad \tilde{r}(t_n) = 1 \quad \text{при } n > 2.$$

На рис .1 приведены результаты моделирования границ устойчивости фильтра с ЭКП, фильтра Калмана и диффузионного фильтра при различных значениях периода поступления информации T , памяти фильтра N и времени памяти фильтра $TF=T \times N$. Момент потери устойчивости фильтров при заданном значении k_v фиксировался, когда на заданном интервале тактов работы фильтра n от 1 до K выполнялось условие

$$|\bar{r}(t_n)| > 100, \quad 1 < n < K.$$

В таблице через \hat{k}_v^l, \hat{k}_v^r обозначены левая и правая оценки границ устойчивости фильтров, полученные в результате моделирования, а через k_v^l, k_v^r – теоретические значения.

Степень влияния ΔR_n^v зависит от способа учета радиальной скорости $v_R(t_n)$ при организации обработки информации. Так, при подстройке частоты гетеродина по априорному значению $v_R(t_n)$ реализация фильтра является устойчивой при любом значении k_v . При подстройке же частоты гетеродина по значениям $v_R(t_n)$, полученной в процессе фильтрации, реализация фильтра может оказаться неустойчивой.

Литература

1. Фарбер В.Е. Анализ характеристик алгоритмов определения параметров движения космических аппаратов по информации радиолокационных средств использующих зондирующие сигналы с линейной частотной модуляцией. – Космические исследования. – 1995. – №1. – Т. 33. – С.31–35.
2. Трофименко М.А., Фарбер В.Е. Оценка влияния скоростного смещения в радиолокационных станциях с ЛЧМ-сигналом на границы устойчивости сопровождения входящих в атмосферу космических объектов. – Труды МФТИ. – 2015. – Т. 7. – №2. – С. 156-166.

Рис. 1. Границы устойчивости фильтра с ЭКП, фильтра Калмана и диффузионного фильтра

TF, с	T, с	N	Фильтр с ЭКП				Диффузионный фильтр		Фильтр Калмана	
			$k_v^l, с$	$\hat{k}_v^l, с$	$k_v^r, с$	$\hat{k}_v^r, с$	$\hat{k}_v^l, с$	$\hat{k}_v^r, с$	$\hat{k}_v^l, с$	$\hat{k}_v^r, с$
5,0	1,0	5,0	-4,0	-4,1	2,5	2,6	-4,1	2,6	-18,0	8,3
10,0	1,0	10,0	-16,5	-16,6	5,0	5,1	-15,4	5,1		
15,0	1,0	15,0	-37,3	-37,5	7,5	7,7	-17,3	7,6		
20,0	1,0	20,0	-66,5	-66,8	10,0	10,4	-17,6	8,3		
25,0	1,0	25,0	-104,0	-104,5	12,5	13,0	-17,8	8,3		
30,0	1,0	30,0	-149,8	-150,5	15,0	15,7	-17,9	8,3		
35,0	1,0	35,0	-204,0	-204,8	17,5	18,4	-17,9	8,3		
40,0	1,0	40,0	-266,5	-267,6	20,0	21,2	-17,9	8,3		
0,5	0,1	5,0	-0,40	-0,41	0,25	0,26	-0,41	0,26	-1,80	0,83
1,0	0,1	10,0	-1,65	-1,66	0,50	0,51	-1,54	0,51		
1,5	0,1	15,0	-3,73	-3,75	0,75	0,77	-1,73	0,76		
2,0	0,1	20,0	-6,65	-6,68	1,00	1,04	-1,76	0,83		
2,5	0,1	25,0	-10,40	-10,45	1,25	1,30	-1,78	0,83		
3,0	0,1	30,0	-14,98	-15,05	1,50	1,57	-1,79	0,83		
3,5	0,1	35,0	-20,40	-20,48	1,75	1,84	-1,79	0,83		
4,0	0,1	40,0	-26,65	-26,76	2,00	2,12	-1,79	0,83		