

УДК 621.396.96+621.396.62+621.391.8

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБЗОРНЫХ РЛС ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ С МНОГОКАНАЛЬНЫМИ ПРИЕМНЫМИ СИСТЕМАМИ В СЛОЖНЫХ СИГНАЛЬНО-ПОМЕХОВЫХ СИТУАЦИЯХ

ВУ ТХАНЬ ХА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

E-mail: kozlov@bsuir.by

Аннотация. Приведены отдельные результаты комплексного, на этапах первичной и вторичной обработки информации, исследования эффективности обзорных РЛС обнаружения воздушных объектов с многоканальными антенными системами. Приведены характеристики процесса сопровождения траектории цели, ошибки сопровождения по дальности и азимуту, показатели полноты выдаваемой радиолокационной информации от параметров алгоритмов первичной обработки информации. Сформулированы рекомендации по рациональным параметрам алгоритмов.

Abstract. The results of detection, measurement and tracking of air objects are presented. The error of tracking in real range and azimuth, the process of tracking the target trajectory, the probability of tracking from the range and the standard deviation of tracking in range and azimuth from the review number of various algorithms are shown.

Постановка задачи

Для исследования влияния алгоритмов первичной обработки информации в обзорных РЛС обнаружения воздушных объектов с многоканальными приемными системами на полноту и точность выдаваемой ими информации необходим совместный анализ как этапа первичной, так и вторичной обработки радиолокационной информации. В [1] приведена соответствующая методика комплексного исследования эффективности функционирования обзорных РЛС обнаружения воздушных объектов в сложных сигнально-помеховых ситуациях (СПС). Рассмотрены модели радиолокационной цели, помех, пространственной ситуации, модели первичной и вторичной обработки в обзорных РЛС.

Целью настоящей работы является влияние параметров адаптивных алгоритмов совместного обнаружения и оценивания угловых координат [2, 3] в обзорной РЛС со сканирующей многоканальной приемной системой на результат сопровождения траектории воздушного объекта.

Моделирование проводится применительно к сложным сигнально-помеховым ситуациям, приведенным в [1]. Ситуации характеризуются высокой динамикой перемещения целей и одного или двух источников помех и воздействием источников помех преимущественно по ближним боковым и главному лепестку ДН антенны основного канала РЛС. Используемые при моделировании иллюстративные параметры РЛС обнаружения воздушного объекта и ее антенной системы приведены в [2].

Результаты моделирования

Для детального анализа взаимосвязи процессов первичной и вторичной обработки в табл. 1. приведены результаты моделирования процесса вторичной обработки в одной из типичных реализаций в течении 20 обзоров. Рассматривалась СПС-1, мощность ИП принималась равной 1 кВт, мешающие отражения отсутствовали, реализовывалась адаптация на основе непосредственного обращения корреляционной матрицы (НОМ), сформированной по $K=20$ отсчетам. Эффективная площадь рассеяния цели принималась равной 1 м^2 . В таблице указаны дальности r_i и азимуты цели α_i , азимут $\alpha_{\text{ИП}}$ ИП, значения сформированной решающей статистики при обнаружении Ψ_i (порог $L=5$), ошибки $\delta_i^{(r)}$, $\delta_i^{(\alpha)}$ оценки дальности до цели, расчетные значения СКО оценивания дальности $\sigma_i^{(r)}$ и азимута цели $\sigma_i^{(\alpha)}$ и результаты сопровождения траектории воздушного объекта в виде фактов

S_i сопровождения и ошибок $\xi_i^{(r)}$, $\xi_i^{(\alpha)}$ по дальности и азимуту. На рис. 1. приведена траектория цели в декартовой системе координат и ошибки сопровождения по дальности и азимуту.

Таблица 1. Результаты обнаружения, измерения и сопровождения в процессе 20 обзоров в СПС-1

№ обз.	Координаты объекта		Азимут ИП, град.	Результаты Измерения					Результаты сопровождения		
	r_i , км	α_i , град		Ψ_i	$\delta_i^{(r)}$, М	$\delta_i^{(\alpha)}$, град	$\sigma_i^{(r)}$, М	$\sigma_i^{(\alpha)}$, град.	S_i	$\xi_i^{(r)}$, м	$\xi_i^{(\alpha)}$, град.
0	202	8,5	-18,6	118,1	-1	0,1	13,8	0,20	0	0,0	0
1	200	8,6	-18,1	123,9	12	0	13,5	0,15	1	-11,9	-0,04
2	198	8,7	-17,6	-0,1	-	-	-	-	1	-24,9	0,01
3	196	8,8	-17,1	129,1	-1	-0,1	13,2	0,15	1	1,4	0,09
4	194	8,9	-16,6	68,9	-40	-0,1	18,1	0,21	1	40,2	0,11
5	192	9,0	-16,1	75,4	1	0,3	17,3	0,19	1	-1,2	-0,21
6	190	9,1	-15,6	24,8	60	-0,6	30,1	0,34	1	-60,6	0,25
7	188	9,2	-15,1	0	-	-	-	-	1	-136,4	0,67
8	186	9,3	-14,6	113,8	1	-0,3	14,1	0,17	1	-1,2	0,28
9	184	9,4	-14,0	168,5	6	-0,1	11,6	0,16	1	-6,4	0,08
10	182	9,5	-13,5	142,8	-10	-0,1	12,6	0,16	1	9,8	0,1
11	181	9,6	-13,0	434,8	4	-0,1	7,2	0,13	1	-4,2	0,1
12	179	9,7	-12,6	170,8	3	0,2	11,5	0,17	1	-3,5	-0,12
13	177	9,8	-12,2	151	16	-0,1	12,2	0,20	1	-15,8	0,03
14	175	9,9	-12,0	46,9	44	0,4	21,9	0,25	1	-43,5	-0,28
15	173	10,0	-11,8	7,5	-6	0,1	54,6	0,45	1	5,5	-0,25
16	171	10,1	-11,8	16,2	45	-0,6	37,3	0,41	1	-44,3	0,42
17	169	10,2	-12,0	65,4	5	0,1	18,5	0,20	1	-5,5	-0,07
18	167	10,4	-12,3	218	18	-0,3	10,2	0,16	1	-18,1	0,27
19	165	10,5	-12,7	12,7	59	-0,2	42,1	0,42	1	-58,6	0,37

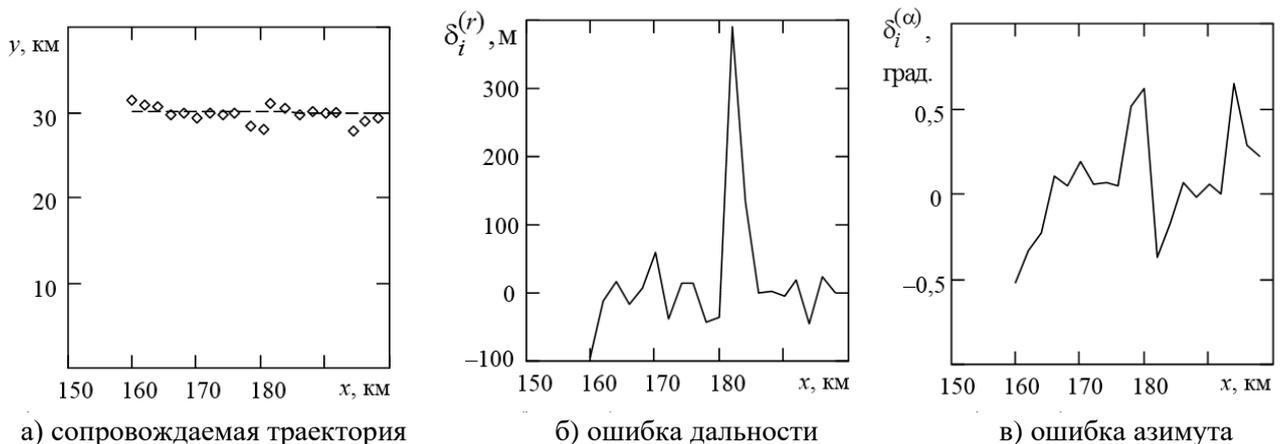


Рис. 1. Характеристики сопровождения в реализации в СПС-1 для алгоритма НОМ, $K = 20$

Видно, что несмотря на необнаружение цели во втором и седьмом обзорах процесс сопровождения является устойчивым. Это достигается за счет высокой точности измерения угловых координат с модулем максимальной ошибки, не превышающей 15% от ширины главного лепестка ДН основного канала. При отключенной компенсации РЛС не способна сопровождать цель, то есть помехи являются подавляющими.

На рис. 2. приведены характеристики сопровождения в одной из реализаций для алгоритма формирования весовых коэффициентов LMS (с нормировкой, параметры скорости и регуляризации

$\mu=0,5, \delta=1$). Точность сопровождения, в сравнении с вариантом НОМ, существенно ухудшилась, на 16 обзоре произошел срыв сопровождения с последующим перезахватом из-за больших ошибок оценивания угловых координат в предшествующих обзорах. Причиной более низкой эффективности алгоритма LMS является неполная компенсация внешних помех за заданный интервал адаптации. При увеличении длительности интервала адаптации до $K=50$ устойчивость и точность процесса сопровождения возрастают (рис. 3.) и характеристики алгоритма приближаются к варианту НОМ.

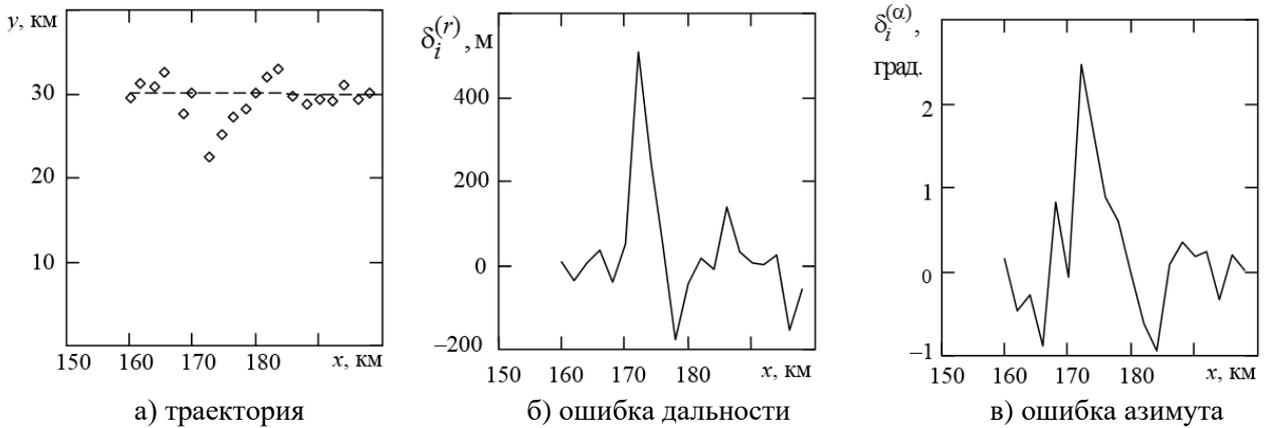


Рис. 2. Характеристики сопровождения в реализации в СПС-1 для алгоритма LMS, $K=20$

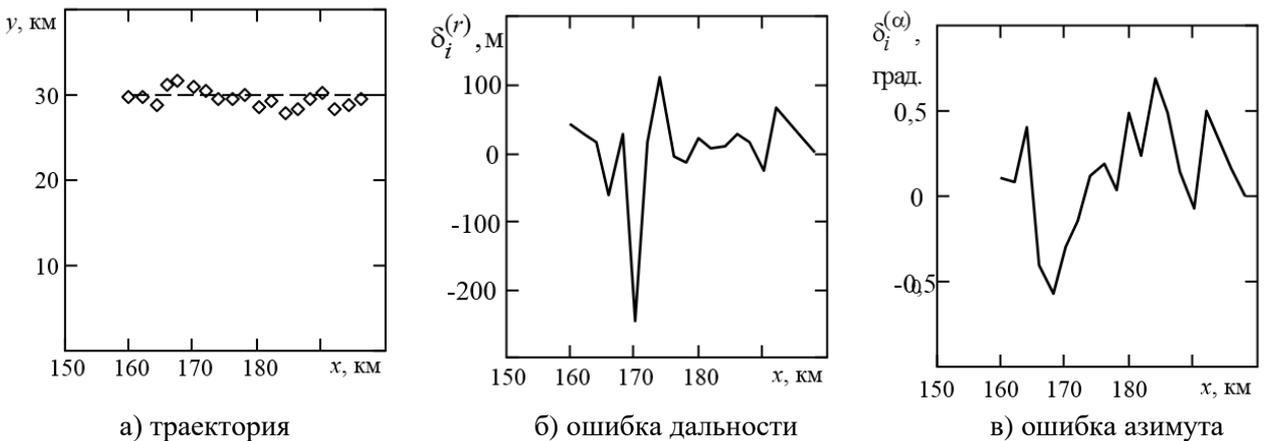


Рис. 3. Характеристики сопровождения в реализации в СПС-1 для алгоритма LMS, $K=50$

На рис. 4 приведены зависимости полноты и точности радиолокационной информации от дальности «РЛС-цель», полученные для СПС-1 при числе отсчетов при адаптации $K=20$, мощности источника помехи 100 Вт при отсутствии мешающих отражений. Как видно из приведенных на рис. 4 зависимостей, использование адаптивных алгоритмов обработки привело к существенному увеличению полноты радиолокационной информации, которая возросла со среднего уровня 0,3 до уровня 0,95 при использовании для формирования весовых коэффициентов алгоритма непосредственного обращения выборочной корреляционной матрицы и до уровня 0,9 при использовании рекурсивного LMS-алгоритма. Одновременно произошло резкое снижение ошибок сопровождения по азимуту – со среднего значения 1 градус до среднего значения 0,4 градуса.

На рис. 5. для тех же исходных данных, что и на рис. 4., приведены зависимости полноты радиолокационной информации для более сложной ситуации СПС-2 при наличии двух источников помех. Для РЛС без адаптивной обработки среднее значение полноты радиолокационной информации не превышает 0,2 и, поэтому, на графиках не приводится. Формирование весовых коэффициентов методом обращения матрицы обладает некоторым преимуществом в сравнении с рекурсивным LMS-алгоритмом. При увеличении мощности помехи или нестационарном характере помехи указанное преимущество возрастает.

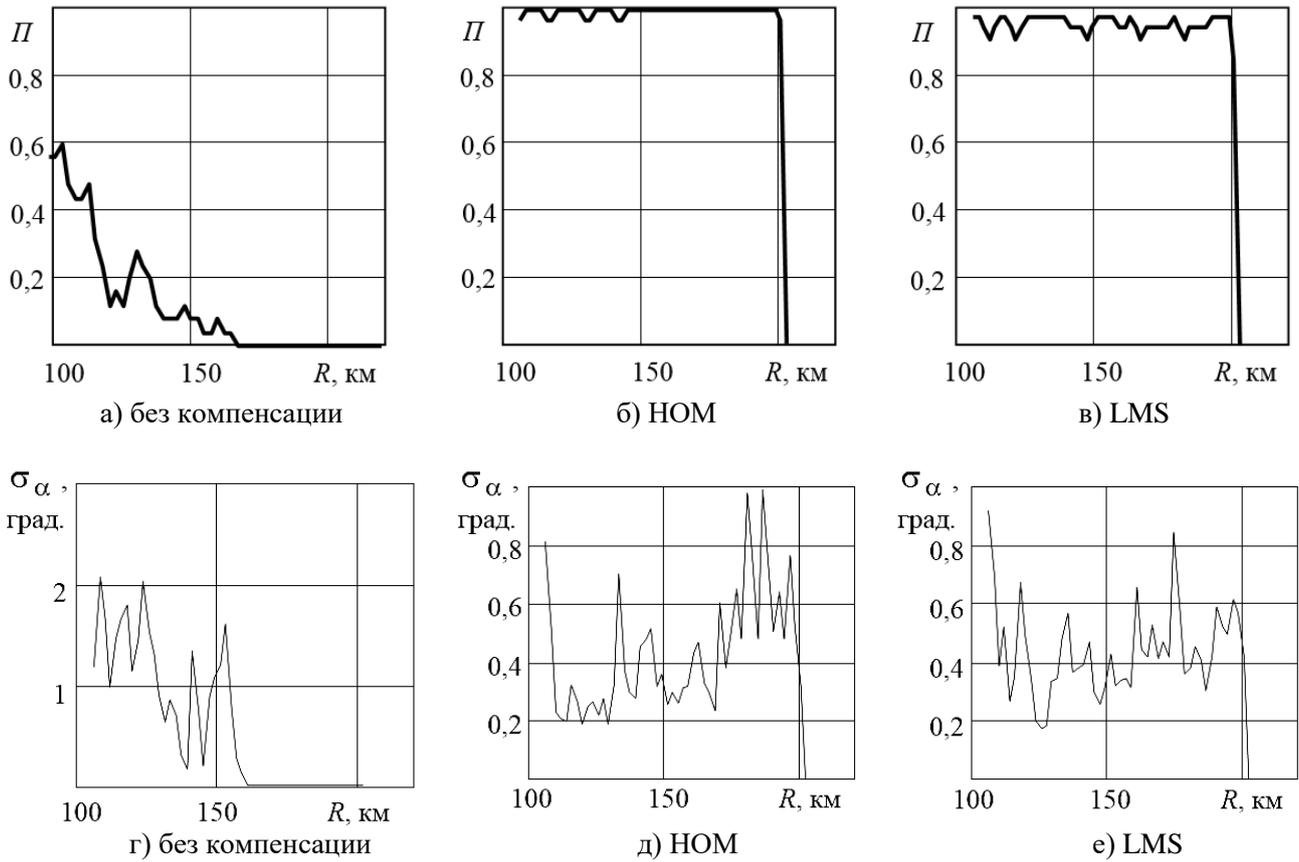


Рис. 4. Зависимости полноты и точности радиолокационной информации от дальности при СПС-1: а, г - без компенсации; б, д - алгоритм НОМ; в, е - рекурсивный LMS-алгоритм

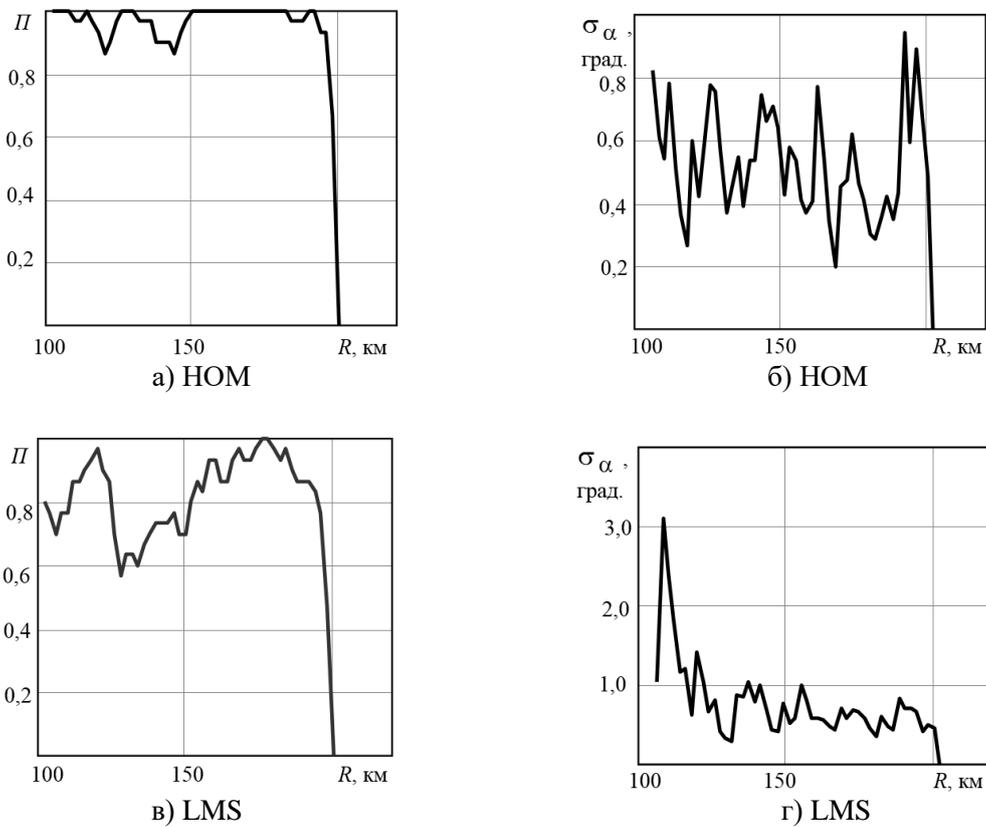


Рис. 5. Зависимости полноты и точности радиолокационной информации от дальности в СПС-2: а,б - алгоритм НОМ; в,г - рекурсивный LMS-алгоритм

Результаты обобщения полноты и точности радиолокационной информации в ТС-1 и ТС-2 приведены в таблице 2. Точность нормированна к ширине главного лепестка основного канала. Оценки получены при ЭПР цели 1 м^2 , мешающих отражений с ЭПР в элементе разрешения 100 м^2 , мощности источников помех 1 кВт . Для формирования весовых коэффициентов использовался метод непосредственного обращения матрицы. Для рекурсивного *LMS*-алгоритма показатели полноты информации снижаются на $0,1 \dots 0,2$.

Таблица 2. Обобщенные показатели полноты и точности радиолокационной информации

Тип ситуации	Известный обнаружитель-измеритель с компенсацией помех и формированием провалов в ДН компенсационных каналов				Предлагаемый обнаружитель-измеритель			
	Дальность 50...100 км		Дальность 100...200 км		Дальность 50...100 км		Дальность 100...200 км	
	Полнота	Точность	Полнота	Точность	Полнота	Точность	Полнота	Точность
СПС-1	>0,95	0,1...0,15	0,7...0,8	0,1...0,15	>0,95	0,1...0,15	>0,95	0,1...0,15
СПС-2	0,8...0,9	0,15...0,2	0,1...0,2	0,3...0,4	>0,95	0,1...0,15	0,7...0,8	0,15...0,2

Таким образом, результаты моделирования подтверждают, что использование обнаружителя-измерителя угловых координат обзорной РЛС с многоканальной приемной системой с обоснованными одно- и двухэтапными адаптивными алгоритмами обработки сигналов [2, 3] обеспечивает существенное повышение эффективности функционирования обзорной РЛС в сложных сигнально-помеховых ситуациях.

Выводы и рекомендации

Предложенные в [2, 3] алгоритмы совместного обнаружения и оценивания угловых координат радиолокационной цели в обзорной РЛС со сканирующими многоканальными приемными системами обеспечивают повышение полноты радиолокационной информации в наиболее сложных сигнально-помеховых ситуациях с уровня $0,1 \dots 0,2$, характерного для существующих обнаружителей-измерителей, до уровня $0,7 \dots 0,8$. Нормированные к разрешающей способности по азимуту средние квадратические ошибки сопровождения по азимуту составят $0,15 \dots 0,2$.

Определенным преимуществом обладает вариант алгоритма обработки, предусматривающий формирование весовых коэффициентов обработки путем непосредственного обращения выборочной корреляционной матрицы процессов на выходах приемных каналов. Преимущество указанного варианта возрастает при увеличении мощности внешних помех.

Полученные результаты могут быть полезны разработчикам радиолокационных средств со сканирующим многоканальными приемными системами и высокими требованиями по помехоустойчивости.

Список использованных источников

1. Ву Тхань Ха. Методика комплексного исследования эффективности функционирования обзорных РЛС обнаружения воздушных объектов с многоканальными приемными системами в сложных сигнально-помеховых ситуациях / Ву Тхань Ха // В настоящем сборнике.
2. Ву Тхань Ха. Оценивание угловых координат в обзорных радиолокационных станциях с подсистемами пространственной компенсации помех / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4(122). – С. 48–56.
3. Ву Тхань Ха. Алгоритмы обработки сигналов в радиолокационных измерителях угловых координат со сканирующей многоканальной антенной системой / Ву Тхань Ха, С. В. Козлов // Журнал радиоэлектроники. – 2019. – № 11. – С. 1–29. DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.10.