

АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ РЛС ОТ ШУМОВЫХ ПОМЕХ. 4. ВЫБОР КОЛИЧЕСТВА, СТРУКТУРЫ И МЕСТОРАСПОЛОЖЕНИЯ КОМПЕНСАЦИОННЫХ МОДУЛЕЙ В РЛС С ПЛОСКОЙ ФАР

В.П. РЯБУХА

Четвертая статья цикла статей по адаптивным системам защиты РЛС от маскирующих шумовых помех. На основе результатов математического моделирования обосновывается количество, структура и расположение системы компенсационных каналов, формируемых из модулей 10000 – элементной плоской квадратной ФАР с 625 (400, 100) модулями размера 4×4 (5×5 , 10×10) при наличии взвешивания выходных сигналов модулей или элементов по законам Тейлора или Хемминга или при его отсутствии для эффективного выделения сигналов на фоне шумовых помех. Оценивается необходимая степень увеличения количества таких каналов при наличии неидентичностей.

Ключевые слова: плоская ФАР, шумовые помехи, компенсационные модули, законы Тейлора и Хемминга, отношение сигнал/(помеха + шум), неидентичности.

ВВЕДЕНИЕ

Данная статья – четвертая в цикле статей по теории и технике адаптивной обработки сигналов на фоне шумовых помех (ШП).

В первой статье [1] проанализированы корреляционные автокомпенсаторы помех на основе градиентных алгоритмов адаптации. Их быстродействие сильно зависит от степени сложности помеховой обстановки – числа, расположения и интенсивности источников внешних шумовых помех (разброса собственных чисел пространственной корреляционной матрицы (КМ) ШП), что приводит к большему времени установления переходных процессов (малому быстродействию), т.е. к необходимости использования большего объема обучающих.

Во второй статье [2] рассмотрены более сложные и быстродействующие квазиньютоновские алгоритмы адаптации на основе оценок максимального правдоподобия пространственных КМ гауссовых шумовых помех общего вида, быстродействие которых не зависит от степени сложности помеховой обстановки. Здесь же рассмотрены их регуляризованные разновидности и обоснована целесообразность их практической реализации на основе адаптивных решетчатых фильтров.

В третьей статье [3] описана математическая модель системы пространственной обработки сигналов на фоне собственного шума излучателей и внешних помех от точечных источников независимых шумовых излучений в РЛС с прямоугольной (в частности, квадратной) плоской ФАР.

В данной статье на основе математической модели системы пространственной обработки сигналов на фоне шумовых помех обоснован выбор количества, структуры и месторасположения системы ком-

пенсационных каналов (модулей) в РЛС с плоской ФАР.

Статья организована следующим образом.

В п. 1 обосновывается количество, структура и месторасположение системы компенсационных каналов в РЛС с плоской ФАР с идентичными каналами приема, а в п. 2 оценивается необходимая степень увеличения числа компенсационных каналов при наличии неидентичностей их частотных (импульсных) характеристик.

1. ВЫБОР КОЛИЧЕСТВА, СТРУКТУРЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ КОМПЕНСАЦИОННЫХ КАНАЛОВ В РЛС С ПЛОСКОЙ ФАР С ИДЕНТИЧНЫМИ КАНАЛАМИ ПРИЕМА

В [2] было отмечено, что на практике широко распространены структуры систем адаптивной пространственной обработки с выделенным (нерегулируемым) основным каналом приема, в котором реализована оптимальная (согласованная или близкая к ней) обработка для условий отсутствия излучений внешних источников шумовых помех. Основным каналом защищается от внешних шумовых излучений системой вспомогательных (компенсационных) каналов [4–6], число которых может быть значительно меньше числа излучателей или модулей ФАР. В качестве компенсационных каналов здесь будем рассматривать компенсационные модули плоской ФАР.

1.1. Методика и условия математических экспериментов

Математическое моделирование проведем применительно к плоской квадратной ФАР, содержащей $M \times M = 100 \times 100 = 10000$ излучателей. Эти излучатели объединены в модули (рис. 1), которые теоретически могут быть произвольного заданного размера. Из сигналов всех модулей образован основной (сум-

марный) канал приема, а из части модулей – компенсационные каналы для защиты основного от мешающих излучений внешних источников шумовых помех. Ее эффективность в общем случае зависит от параметров (количества, расположения и структуры) компенсационных каналов. Используемые модули из смежных излучателей размеров $L \times L$ с $L=4, 5, 10$ показаны на рис. 1, б–г. Число таких модулей $M_L^2 = M^2 / L^2 = 625$ (25×25), 400 (20×20) и 100 (10×10) соответственно.

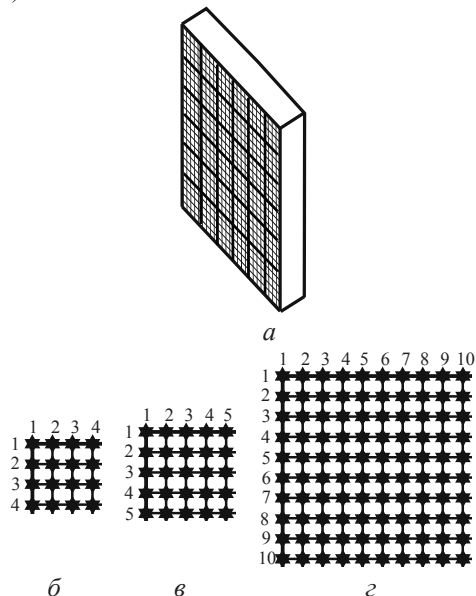


Рис. 1. ФАР (а) и ее модули (б–г)

Анализируются два варианта "взвешивания" – **поэлементное** (взвешиваются сигналы $M^2 = 10000$ излучателей **перед** объединением в модули) и **помодульное** – (взвешиваются сигналы **предварительно** сформированных модулей). Каждый из них анализировался при использовании коэффициентов взвешивания **Тейлора** и **Хемминга** с равным уровнем "пьедестала" ([3], п. 2.4). Основное внимание уделено распределениям, обеспечивающим относительный уровень боковых лепестков ≈ -45 дБ относительно главного максимума синфазной диаграммы направленности (ДН) ФАР. Для распределения Тейлора это обеспечивают параметры $P=8$, $A=1,8701$ ([3], п. 2.4), для распределения Хемминга – параметр, выравнивающего пьедесталы обоих распределений. Наряду с ними рассматривается равномерное амплитудное распределение (режим "без взвешивания").

Системы пространственной обработки исследовались в помеховых ситуациях, предусматривающих наличие до $n \leq 4$ внешних источников шумовых помех (**ИШП**) в зоне боковых лепестков ДН плоской ФАР, и одного – в главном лепестке.

Эффективность пространственной обработки оценивалась по величине выходного отношения сигнал/(помеха + шум) (**ОСПШ**) μ в гипотетической ситуации известной корреляционной матрицы адди-

тивной смеси **ШП** и внутреннего шума в заданном весовом векторе \mathbf{r}

$$\mu = \frac{\mathbf{r}^* \cdot \Phi_s \cdot \mathbf{r}}{\mathbf{r}^* \cdot \Phi_{int} \cdot \mathbf{r}}. \quad (1)$$

Здесь Φ_s , Φ_{int} – корреляционные матрицы (**КМ**) сигнала и **совокупной** помехи.

Вначале проанализируем эффективность выделения сигналов на фоне шумовых помех при идентичных частотных (импульсных) характеристиках, а затем при наличии разного рода неидентичностей.

1.2. Эффективность компенсационных модулей размера 4x4 при воздействии ИШП по боковым лепесткам ДН плоской ФАР

Для $n \leq 4$ источников шумовых помех, действующих по боковым лепесткам ДН 625 – модульной квадратной (25×25) плоской ФАР, первоначальный анализ проведем для четырех ($M_{comp} = 4$) идентичных компенсационных каналов, образованных отдельными модулями размера 4x4. Анализировалось 14 вариантов расположения этих модулей, приведенных в табл. 1. Варианты 1, 11 и 12 показаны также на рис. 2.

Таблица 1
Варианты расположения четырех компенсационных модулей размера 4x4

Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
77, 172, 379, 544	28, 218, 349, 460	108, 266, 412, 530
Вариант №4	Вариант №5	Вариант №6
126, 186, 371, 433	156, 240, 335, 495	73, 205, 517, 581
Вариант №7	Вариант №8	Вариант №9
89, 234, 394, 478	21, 177, 440, 608	144, 282, 464, 559
Вариант №10	Вариант №11	Вариант №12
124, 256, 386, 566	501, 502, 503, 504	526, 551, 576, 601
Вариант №13	Вариант №14	
132, 191, 345, 438	162, 268, 365, 407	

В вариантах 1 – 10, 13, 14 они размещаются с пространственным разномом в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а в вариантах 11 и 12 они располагаются на горизонтальной и вертикальной линиях соответственно (рис. 2, б).

На рис. 3 приведены зависимости предельных значений **ОСПШ** μ_{max} , обеспечиваемых оптимальным весовым вектором $\mathbf{r} = \mathbf{r}_{opt}$, от варианта расположения четырех компенсационных модулей размера 4x4 при «помодульном взвешивании» по закону Тейлора и **ШП**, создаваемых тремя (а) и четырьмя (б) источниками по боковым лепесткам ДН ФАР при отношении помеха/шум (**ОПШ**), равном 40, 50 и 60 дБ.

1	26	51	76	101	126	151	176	201	226	251	276	301	326	351	376	401	426	451	476	501	526	551	576	601
2	27	52	77	102	127	152	177	202	227	252	277	302	327	352	377	402	427	452	477	502	527	552	577	602
3	28	53	78	103	128	153	178	203	228	253	278	303	328	353	378	403	428	453	478	503	528	553	578	603
4	29	54	79	104	129	154	179	204	229	254	279	304	329	354	379	404	429	454	479	504	529	554	579	604
5	30	55	80	105	130	155	180	205	230	255	280	305	330	355	380	405	430	455	480	505	530	555	580	605
6	31	56	81	106	131	156	181	206	231	256	281	306	331	356	381	406	431	456	481	506	531	556	581	606
7	32	57	82	107	132	157	182	207	232	257	282	307	332	357	382	407	432	457	482	507	532	557	582	607
8	33	58	83	108	133	158	183	208	233	258	283	308	333	358	383	408	433	458	483	508	533	558	583	608
9	34	59	84	109	134	159	184	209	234	259	284	309	334	359	384	409	434	459	484	509	534	559	584	609
10	35	60	85	110	135	160	185	210	235	260	285	310	335	360	385	410	435	460	485	510	535	560	585	610
11	36	61	86	111	136	161	186	211	236	261	286	311	336	361	386	411	436	461	486	511	536	561	586	611
12	37	62	87	112	137	162	187	212	237	262	287	312	337	362	387	412	437	462	487	512	537	562	587	612
13	38	63	88	113	138	163	188	213	238	263	288	313	338	363	388	413	438	463	488	513	538	563	588	613
14	39	64	89	114	139	164	189	214	239	264	289	314	339	364	389	414	439	464	489	514	539	564	589	614
15	40	65	90	115	140	165	190	215	240	265	290	315	340	365	390	415	440	465	490	515	540	565	590	615
16	41	66	91	116	141	166	191	216	241	266	291	316	341	366	391	416	441	466	491	516	541	566	591	616
17	42	67	92	117	142	167	192	217	242	267	292	317	342	367	392	417	442	467	492	517	542	567	592	617
18	43	68	93	118	143	168	193	218	243	268	293	318	343	368	393	418	443	468	493	518	543	568	593	618
19	44	69	94	119	144	169	194	219	244	269	294	319	344	369	394	419	444	469	494	519	544	569	594	619
20	45	70	95	120	145	170	195	220	245	270	295	320	345	370	395	420	445	470	495	520	545	570	595	620
21	46	71	96	121	146	171	196	221	246	271	296	321	346	371	396	421	446	471	496	521	546	571	596	621
22	47	72	97	122	147	172	197	222	247	272	297	322	347	372	397	422	447	472	497	522	547	572	597	622
23	48	73	98	123	148	173	198	223	248	273	298	323	348	373	398	423	448	473	498	523	548	573	598	623
24	49	74	99	124	149	174	199	224	249	274	299	324	349	374	399	424	449	474	499	524	549	574	599	624
25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550	575	600	625

501	526	551	576	601
502	527	552	577	602
503	528	553	578	603
504	529	554	579	604

б

а

Рис. 2. Варианты 1 (а), 11 и 12 (б) размещения компенсационных модулей плоской ФАР

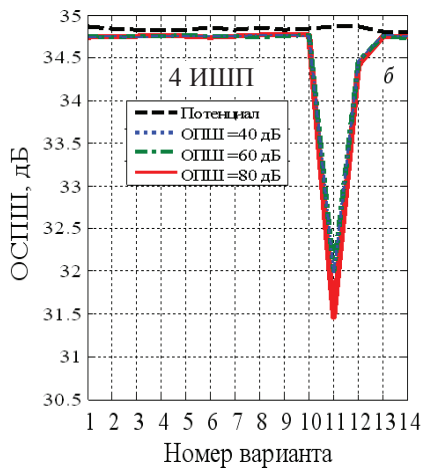
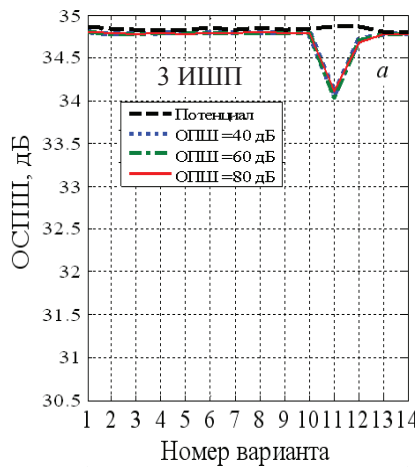


Рис. 3. Зависимости ОСПП от номера варианта расположения четырех компенсационных модулей (помодульное взвешивание "по Тейлору")

Как следует из этого рисунка, сравниваемые системы компенсационных каналов, за исключением вариантов №11 и №12, даже в условиях интенсивных внешних помех обеспечивают почти такую же потенциальную эффективность, как и оптимальная (согласованная) обработка при отсутствии внешних по-

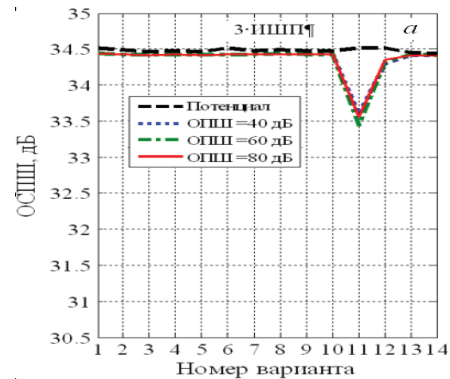
мех (штриховые кривые). Варианты №11 и №12 (рис. 2, б) проигрывают в эффективности остальным из-за уменьшенного числа "степеней свободы", и тем больше, чем больше число источников помех.

Очевидно поэтому, что разность компенсационных модулей, число которых не меньше числа источников мешающих излучений как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, подобный использованному в вариантах 1 – 10, 13, 14, потенциально обеспечит практически полное подавление внешних помех и эффективность, близкую к потенциально возможной в их отсутствие.

На рис. 4 приведены зависимости, аналогичные зависимостям рис. 3, но при помодульном взвешивании по закону Хемминга.

Из сравнения рис. 3 и рис. 4 видно, что отличия потенциальных возможностей обработки при рассматриваемых законах взвешивания практически незначительны, что связано с близостью этих законов при равенстве "пьедесталов".

Рис. 5 аналогичен рис. 3, но в случае поэлементного взвешивания. Видно, что в этом случае потенциальные возможности обработки практически такие же, как и при помодульном взвешивании.



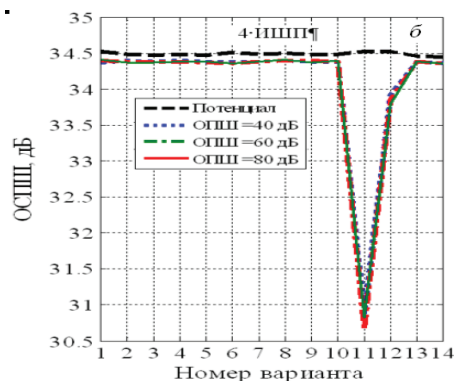


Рис. 4. Зависимости ОСПШ от номера варианта расположения четырех компенсационных модулей (помодульное взвешивание "по Хеммингу")

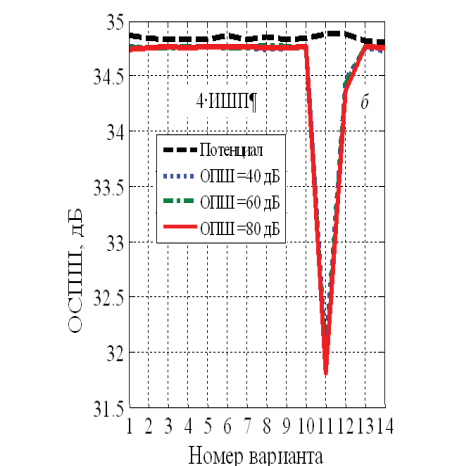
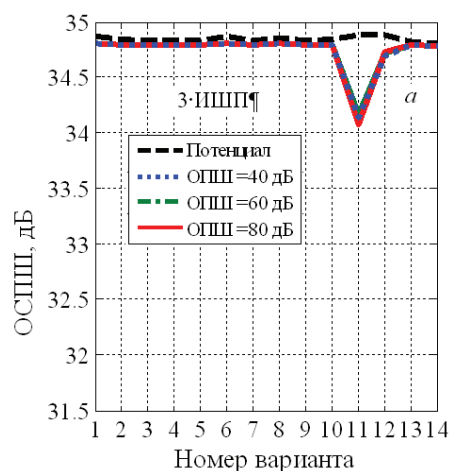


Рис. 5. Зависимости ОСПШ от номера варианта расположения четырех компенсационных модулей (поэлементное взвешивание "по Тейлору")

Этот результат вполне естественен, поскольку эти возможности определяются не столько порядком взвешивания, сколько требованиями к числу и расположению приемных каналов, которые в рассматриваемых примерах совпадают.

На рис. 6 приведены результаты математического моделирования, аналогичные результатам рис. 3, но при использовании пяти компенсационных моду-

лей размера 4×4 для 14 вариантов их размещения приведены в табл. 2.

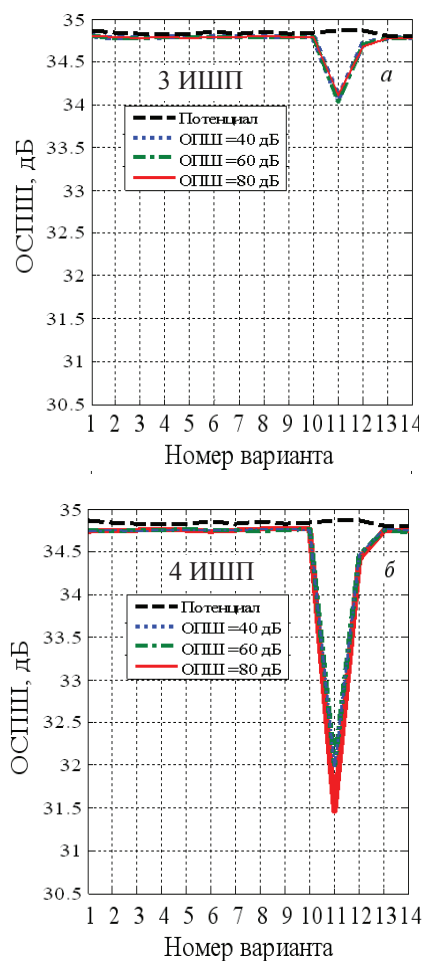


Рис. 6. Зависимости ОСПШ от номера варианта расположения пяти компенсационных модулей (помодульное взвешивание "по Тейлору")

Таблица 2

Варианты расположения пяти компенсационных модулей размера 4×4

Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
77, 172, 379, 544, 312	28, 218, 349, 460, 506	108, 266, 412, 530, 321
Вариант №4	Вариант №5	Вариант №6
126, 186, 371, 433, 515	156, 240, 335, 495, 533	73, 205, 517, 581, 288
Вариант №7	Вариант №8	Вариант №9
89, 234, 394, 478, 331	21, 177, 440, 608, 260	144, 282, 464, 559, 522
Вариант №10	Вариант №11	Вариант №12
124, 256, 386, 566, 469	501, 502, 503, 504, 505	526, 551, 576, 601, 501
Вариант №13	Вариант №14	
132, 191, 345, 438, 553	162, 268, 365, 407, 71	

Анализ рис. 6 и рис. 3 подтверждает физически очевидный результат того, что в рассматриваемых идеализированных условиях точного знания статистических характеристик сигналов и помех в

идентичных каналах приема увеличение числа компенсационных каналов выше числа внешних источников помех не может заметно увеличить эффективность обработки (которая и без этого увеличения практически такая же, как и в отсутствие внешних помех). Это подтверждается также зависимостями предельного значения **ОСПШ** от количества компенсационных модулей, показанных на рис. 7, из которого следует, что рост числа компенсационных каналов при превышении количества **ИШП** весьма незначительно (на доли дБ) увеличивает **ОСПШ** (это увеличение заметно только на рис. 7, б, где увеличен масштаб по сравнению с рис. 7, а).

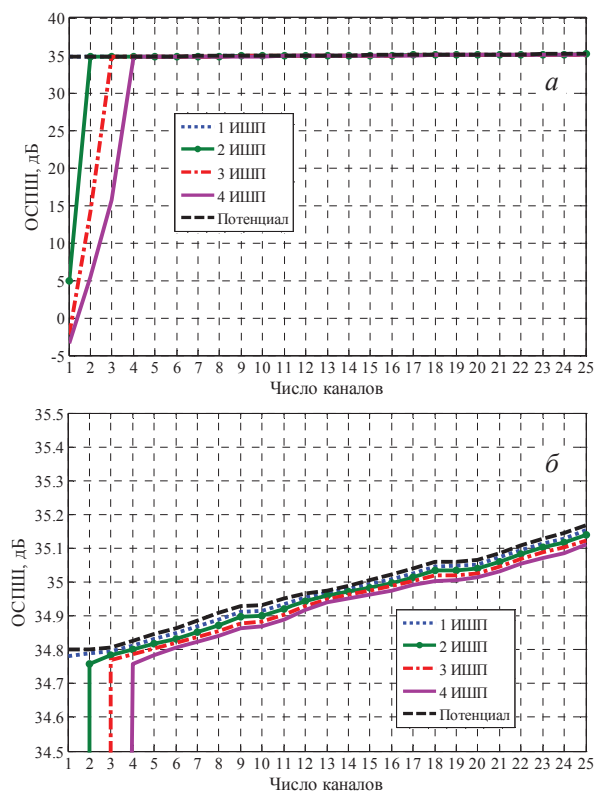


Рис. 7. Зависимости **ОСПШ** от числа компенсационных модулей (помодульное взвешивание "по Тейлору")

Таким образом, приведенные результаты математического моделирования количественно иллюстрируют известный из теории и практики радиолокации результат, в соответствии с которым для эффективной пространственной обработки отраженного сигнала на фоне интенсивных шумовых излучений внешних точечных источников, действующих по боковым лепесткам ДН ФАР, требуемое число идентичных компенсационных каналов должно быть не меньше числа источников.

Теперь рассмотрим эффективность компенсационных модулей при равномерном амплитудном распределении. На рис. 8, а приведены зависимости предельных значений **ОСПШ** от варианта расположения четырех компенсационных модулей размера 4×4 в режиме "без взвешивания", а на рис. 8, б – зависимо-

сти предельного значения **ОСПШ** от количества компенсационных модулей.

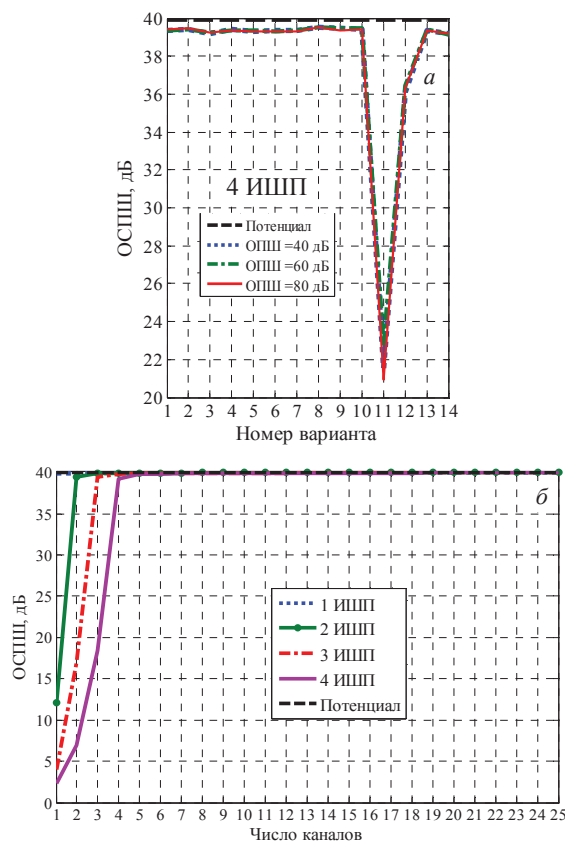


Рис. 8. Зависимости **ОСПШ** от номера варианта расположения четырех компенсационных модулей (а) и от их количества (б) при отсутствии «взвешивания»

Из сравнения рис. 8 с рис. 3, 4, 7 видно, что эффективность оптимальной обработки сигналов, как при отсутствии внешних **ШП** (Потенциал, штриховая линия на рисунках), так и при их наличии в режиме "без взвешивания" выше, чем при взвешивании выходных сигналов модулей ФАР.

Этот результат физически очевиден. Например, при отсутствии внешних **ШП** и при отсутствии взвешивания исходный белый внутренний шум в пространственных каналах остается белым и на выходе блока формирования модулей, а согласованная обработка сигнала на его фоне – оптимальной. Обеспечиваемое ею отношение сигнал/шум (**ОСШ**) в рассматриваемых условиях не может быть больше ни при какой другой линейной (весовой) обработке. В условиях рассматриваемой ФАР с 10000 излучателями при единичной амплитуде h_s входного сигнала это **ОСШ** (Потенциал) равно 10000 (40 дБ).

При использовании взвешивания по законам Тейлора или Хемминга потенциальное значение **ОСШ** уменьшается примерно на 5,2 дБ (рис. 3, 4). При этом, как известно, главный лепесток ФАР расширяется, его уровень уменьшается, а уровень боко-

вых лепестков также уменьшается по сравнению с равномерным амплитудным распределением.

В условиях внешних **ШП** система компенсационных каналов обеспечивают в режиме "без взвешивания" эффективность, близкую к 40 дБ (рис. 8), т.е. большую, чем в режимах "взвешивания".

Таким образом, уменьшения уровня боковых лепестков ДН ФАР за счет взвешивания выходных сигналов ее модулей приводит к ухудшению эффективности выделения полезных сигналов на фоне шумовых помех.

1.3. Эффективность компенсационных модулей размера 4×4 при дополнительном воздействии источника **ШП** по главному лепестку ДН плоской ФАР

Рассмотрим ситуацию, когда наряду с воздействием трех-четырех **ИШП** по боковым лепесткам (п. 1.2), один **ИШП** воздействует по главному лепестку ДН ФАР с относительной угловой координатой 0.5 – 0.6 или 0.6 – 0.8 полуширины ширины главного луча по нулевому уровню при отсутствии сглаживания. Для этого случая зависимости предельных значений **ОСПШ** μ_{\max} от варианта расположения пяти компенсационных модулей размера 4×4 (табл. 2) при «помодульном взвешивании» по закону Хемминга показаны на рис. 9.

Из сравнения рис. 9 и рис. 4 видно, что в этой ситуации эффективность обработки заметно ниже, чем при отсутствии источника **ШП** в зоне главного луча ДН ФАР. Причина этого физически достаточно очевидна – формируемый в этом случае оптимальной обработкой "провал" в ДН в направлениях на источники помех имеет конечную ширину и крутизну, что ослабляет не только помеху, но и полезный сигнал цели с малым угловым расстоянием от источника помехи.

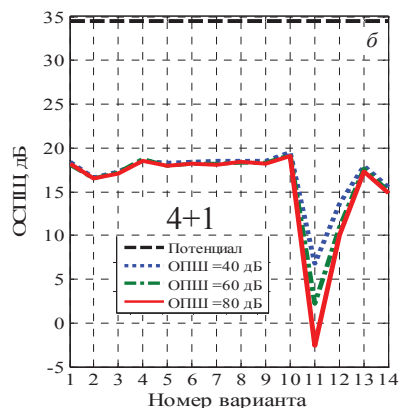
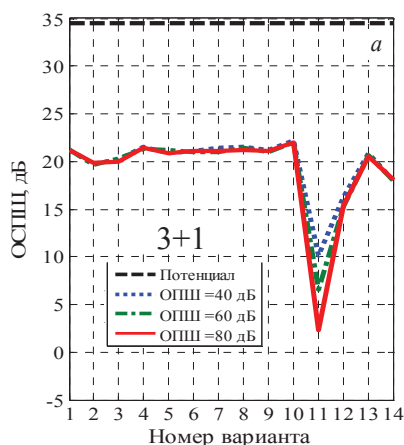


Рис. 9. Зависимость **ОСПШ** от номера варианта расположения пяти компенсационных модулей при помодульном взвешивании "по Хеммингу" и действию **ИШП** по главному (0.5–0.6) и боковым лепесткам ДН

Для этой ситуации на рис. 10 приведены зависимости **ОСПШ** от числа компенсационных каналов, разнесенных как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, при действии одного **ИШП** по главному (в диапазонах 0.5–0.6 (а) и 0.6–0.8 (б)) и остальных по боковым лепесткам ДН ФАР.

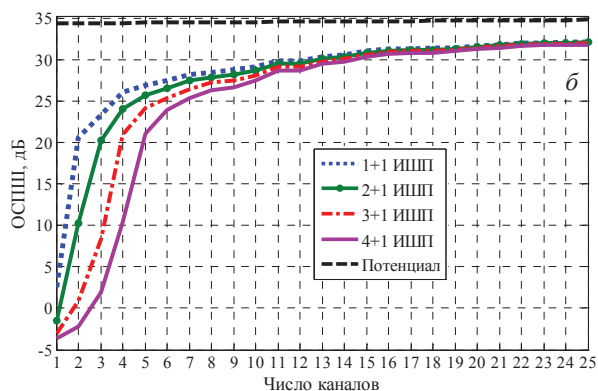
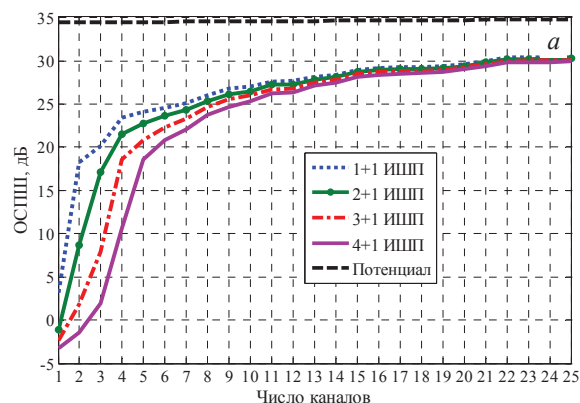


Рис. 10. Зависимость **ОСПШ** от числа компенсационных модулей при поэлементном взвешивании по Хеммингу и действию **ИШП** по главному (в диапазонах 0.5–0.6 (а) и 0.6–0.8 (б)) и боковым лепесткам ДН ФАР

В отличие от условий рис. 7, где источники помех располагаются только в направлениях боковых лепестков, здесь выигрыш от увеличения числа компенсационных каналов в 3–4 раза по сравнению с числом источников **ИШП** составляет не доли, а 10 и более дБ. Этот выигрыш обусловлен тем, что увеличение числа компенсационных каналов приводит к формированию более узкого и "крутого" провала.

1.4. Эффективность компенсационных модулей размера 5×5 и 10×10 при воздействии ИШП по боковым лепесткам ДН плоской ФАР

Рассмотрим эффективность компенсационных модулей при их "укрупнении" до размера 5×5 и 10×10 (рис. 1), когда их общее число, образующее основной (суммарный) канал, равно 400 и 100 соответственно.

Так, на рис. 11 показаны зависимости предельных значений **ОСПШ** μ_{max} от варианта расположения четырех компенсационных модулей размера 4×4 (табл. 3) при «помодульном взвешивании» по закону Хемминга, а на рис. 12 – зависимости **ОСПШ** от числа идентичных компенсационных каналов в этих условиях.

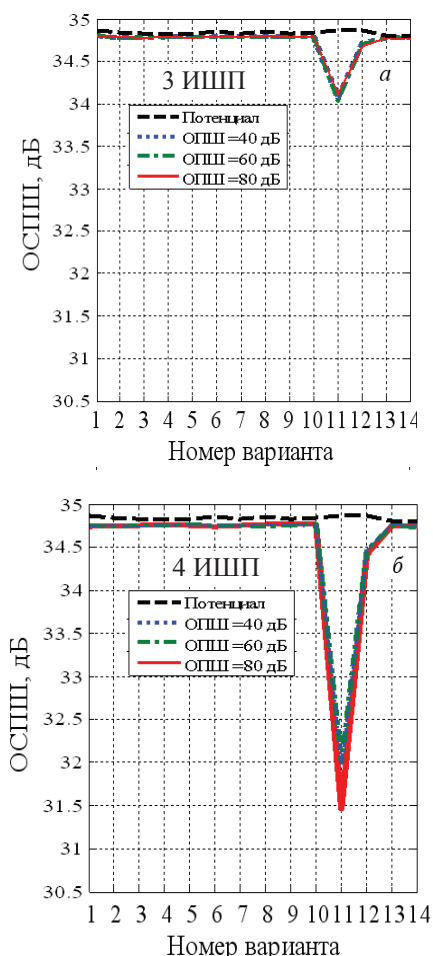


Рис. 11. Зависимость **ОСПШ** от номера варианта расположения четырех компенсационных модулей размера 5×5 (помодульное взвешивание "по Хеммингу")

Таблица 3

Варианты расположения четырех компенсационных модулей размера 5×5

Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3
62, 116, 226, 333	23, 128, 258, 350	85, 177, 274, 368
Вариант №4	Вариант №5	Вариант №6
83, 151, 276, 327	104, 196, 335, 352	58, 126, 293, 329
Вариант №7	Вариант №8	Вариант №9
73, 147, 237, 304	36, 165, 251, 308	95, 172, 224, 310
Вариант №10	Вариант №11	Вариант №12
50, 194, 287, 377	261, 262, 263, 264	321, 341, 361, 381
Вариант №13	Вариант №14	
89, 212, 285, 355	67, 154, 270, 344	

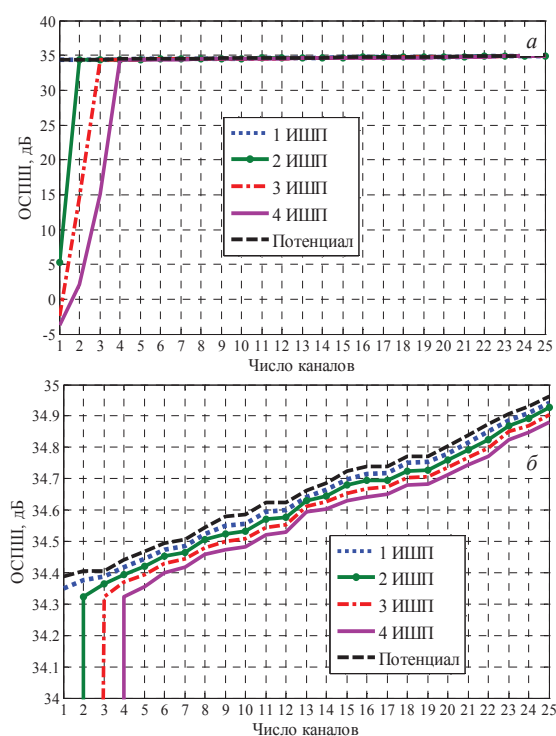


Рис. 12. Зависимость **ОСПШ** от числа компенсационных модулей размера 5×5 и действия ИШП по боковым лепесткам ДН

Из сравнения рис. 11 и рис 4, рис. 12 и рис. 7 видно, что результаты для модулей размера 5×5 практически совпадают с аналогичными для модулей размера 4×4. Причина в том, что в условиях, когда каналы приема идентичны, а источник **ИШП** в главном луче отсутствует, близкая к предельной эффективность оптимальной обработки обеспечивается уже при числе компенсационных каналов, равном числу источников излучений. Это условие выполняется для модулей обоих рассмотренных размеров, что и объясняет практическое совпадение эффективности обработки на их основе. Однако, при дальнейшем "укрупнении" модулей различия могут возрасти.

На рис. 13 показаны зависимости **ОСПШ** от номера варианта расположения четырех идентичных

модулей размера 10×10 , разнесенных как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

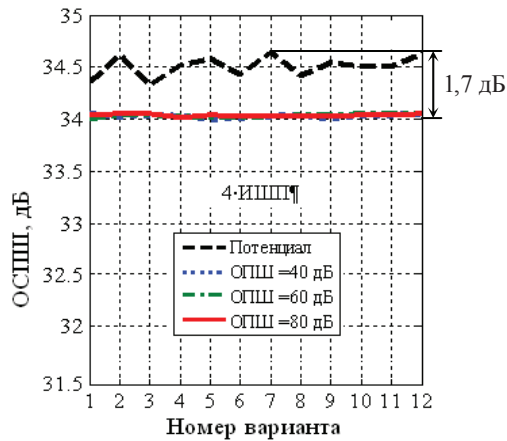


Рис. 13. Зависимость **ОСПШ** от номера варианта расположения четырех компенсационных модулей размера 10×10

На рис. 14, *а, б* показаны зависимости **ОСПШ** от числа компенсационных модулей размера 10×10 при воздействии источников **ИШП** по боковым лепесткам ДН, а на рис. 14, *в* при дополнительном воздействии одного источника по главному лучу с относительной угловой координатой $0.5-0.6$ полуширины этого луча по нулевому уровню.

Из сравнения рис. 14, *а, б* с рис. 7, 12 видно, что прирост эффективности за счет увеличения числа "больших" (10×10) компенсационных модулей, несколько больше и составляет до 1,7 дБ (см. также рис. 13), чем при том же числе "маленьких" (4×4 , рис. 7 и 5×5 , рис. 12), где этот выигрыш составляет доли дБ.

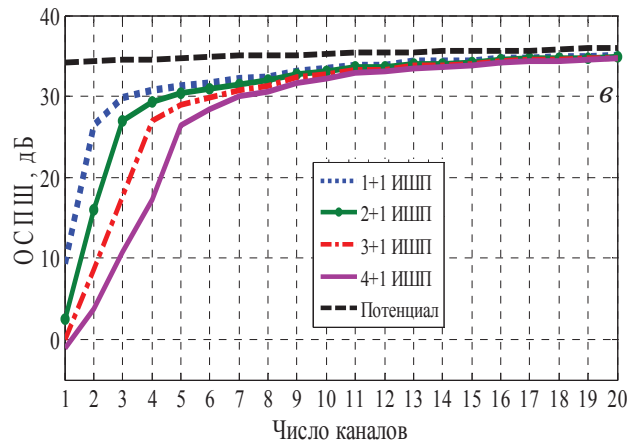
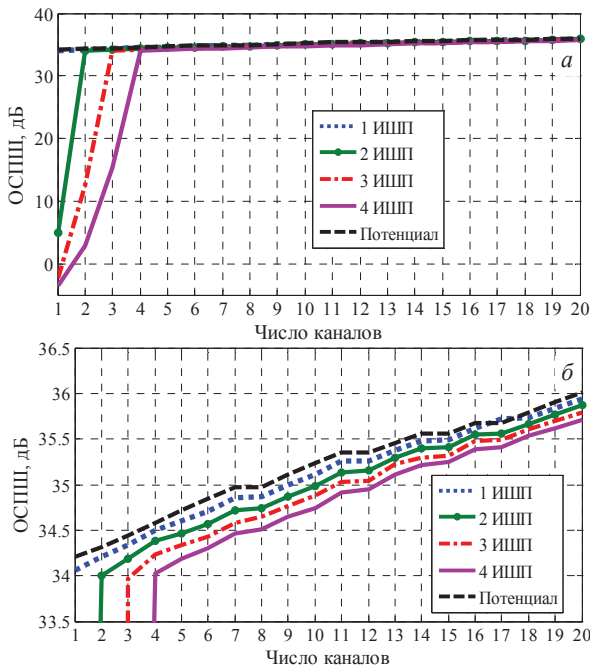


Рис. 14. Зависимости **ОСПШ** от числа компенсационных модулей размера 10×10 , источника **ИШП** – в боковых лепестках ДН (*а, б*) и один дополнительно в главном ($0.5-0.6$) (*в*)

Это объясняется тем, что при равном абсолютном числе компенсационных модулей их относительная доля в общем числе модулей, образующих основной канал, в "больших" модулях выше, чем в "маленьких". Рост этой доли увеличивает эффективность вводимых компенсационных каналов.

Кроме того, из сравнения рис. 14, *в* с рис. 10, *а* видно, что при дополнительном воздействии источника **ИШП** по главному лепестку ДН степень превышения числа компенсационных каналов над общим числом **ИШП** может быть меньшей (2–3 раза) при "укрупнении" модулей до размера 10×10 , поскольку при этом формируется более узкий и "крутой" провал в ДН.

2. ВЫБОР КОЛИЧЕСТВА КОМПЕНСАЦИОННЫХ КАНАЛОВ В РЛС С ПЛОСКОЙ ФАР И НЕИДЕНТИЧНЫМИ КАНАЛАМИ ПРИЕМА

Неидентичности каналов приема, т.е. различия их частотных (импульсных) характеристик декоррелирует входные сигналы, снижая тем самым эффективность обработки полезных сигналов на фоне **ИШП**. Потери эффективности зависят от степени декорреляции, расчетные соотношения для которой выведены в [3], п. 2.5. При этом рассматривались различия следующих параметров частотных (импульсных) характеристик каналов приема:

- ширины частотной характеристики (полосы пропускания);
- временного сдвига огибающей импульсной характеристики (**ИХ**);
- сдвига центральной частоты от номинального значения;
- наклонов прямой, характеризующей зависимость частоты от времени ЛЧМ сигнала.

В [7] показано, что «неидентичность частотных характеристик трактов многоканального пространственного приема приводит к увеличению

размерности помехового пространства – к появлению дополнительного числа кажущихся помех». Поэтому рост числа компенсационных каналов может быть важной мерой повышения эффективности обработки.

Здесь, применительно к модульной плоской ФАР, оценим необходимую степень увеличения числа таких каналов. В этой связи на рис. 15 показаны экспериментальные зависимости **ОСПШ** от числа компенсационных модулей при возможных значениях суммарной дисперсии вышеперечисленных параметров неидентичности для ЛЧМ сигнала $\sigma^2 = 10^{-4}$ (а) и $\sigma^2 = 5 \cdot 10^{-4}$ (б).

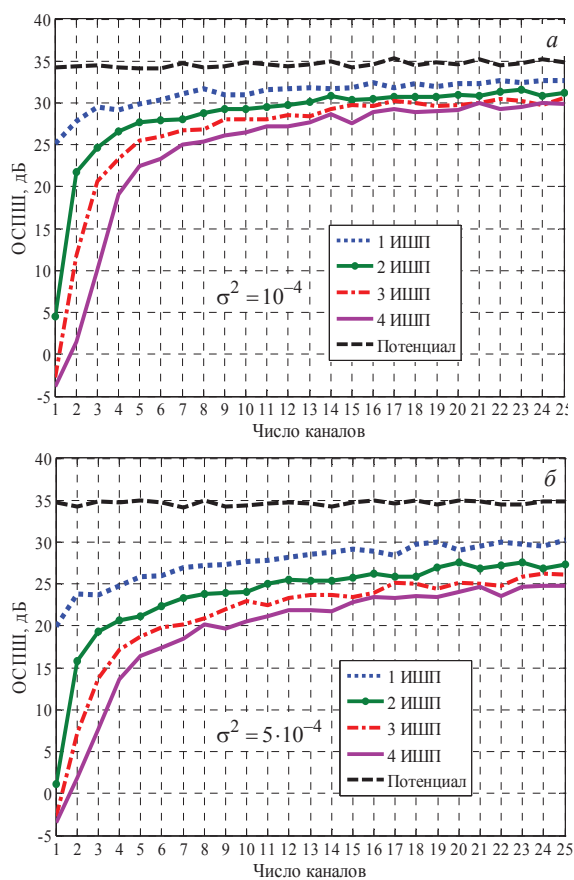


Рис. 15. Зависимости **ОСПШ** от числа компенсационных модулей размера 4×4 при неидентичных каналах приема

Видно, что в этих условиях число компенсационных каналов, равное числу внешних источников, не позволяет приблизить эффективность обработки к предельной (подобной достигнутой в условиях рис. 7). Для приближения к ней требуется увеличивать число компенсационных каналов, и тем в большей степени, чем выше дисперсия параметров неидентичности. Для заданных на рис. 15 возможных значениях суммарной дисперсии параметров неидентичности это увеличение составляет 2–3 раза.

В этом случае растет вероятность того, что в увеличенном числе каналов со случайными парамет-

рами неидентичности найдется $m \geq n$ "хороших" **ИХ**, необходимых для эффективной компенсации излучений n внешних источников. Такое увеличение количества каналов может оказаться более простым по сравнению с контролем и минимизацией степени разброса **ИХ** каналов приема. Возможно также совмещение этих двух мер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе результатов математического моделирования обосновано количество, структура и расположение системы компенсационных каналов, формируемых из модулей 10000 – элементной ФАР с 625 (400, 100) модулями размера 4×4 (5×5 , 10×10) при взвешивании выходных сигналов модулей или элементов по законам Тейлора или Хемминга для эффективного выделения сигналов на фоне шумовых помех (**ШП**).

2. Показано, что при действии источников **ШП** по боковым лепесткам ДН плоской ФАР разнос компенсационных идентичных модулей, число которых не меньше числа источников мешающих излучений, как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях, подобный использованному в вариантах 1 – 10, 13, 14 (табл. 1, рис. 1, а), потенциально обеспечит почти полное подавление внешних помех и эффективность, близкую к потенциально возможной в их отсутствие. Дальнейший рост числа идентичных компенсационных каналов в этих условиях практически не повышает эффективность пространственной обработки.

3. При дополнительном действии источника **ШП** в области главного луча ДН ФАР число компенсационных каналов должно увеличиваться в 3–4 раза при размере модулей 4×4 , и тем сильнее, чем меньше угловое расстояние между целью и этим источником. За счет этого сужается "провал" ДН в направлении на источник помехи и увеличивается его крутизна, что уменьшает подавление полезного сигнала цели с малым угловым расстоянием от источника помехи. Требуемая степень увеличения числа компенсационных каналов уменьшается по мере "укрупнения" модулей, при переходе от модулей размера 4×4 к модулям размера 10×10 до двух – трех раз.

4. Показано, что эффективность выделения сигналов на фоне шумовых помех слабо зависит от порядка (помодульное или поэлементное) и вида взвешивания (по законам Тейлора или Хемминга). Это позволяет, в частности, для простоты реализации без потери эффективности взвешивать сигналы именно на выходе модулей, а не элементов ФАР.

5. Однако по сравнению с равномерным амплитудным распределением уменьшение уровня боковых лепестков ДН ФАР за счет взвешивания выходных сигналов ее модулей приводит к ухудшению эффективности выделения полезных сигналов на фоне шумовых помех до 5–6 дБ. Такое уменьшение не компенсируется его достоинством – уменьшением ин-

тенсивности внешних помех на входе приемника за счет снижения уровня боковых лепестков. Поэтому с точки зрения выделения сигналов на фоне ШП применение взвешивания не является целесообразным. В тоже время такое взвешивание может быть целесообразным для решения других задач, например, для повышения разрешающей способности по угловым координатам при разрешении «слабых» сигналов на фоне «сильных».

6. В реальных условиях неидентичных импульсных характеристик (ИХ) каналов приема число компенсационных модулей должно в 2–3 раза превышать число внешних источников. За счет этого растет вероятность того, что в увеличенном числе каналов со случайными параметрами неидентичности найдется $m \geq n$ "хороших" ИХ, необходимых для эффективной компенсации излучений n внешних источников.

Литература

- [1] Рябуха В.П. Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 1. Корреляционные автокомпенсаторы на основе стохастических градиентных алгоритмов адаптации – Х.: Прикладная радиоэлектроника. — 2016. — Т. 15, № 1 — С. 11–25.
- [2] Рябуха В.П. Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 2. Квазиньютоновские корреляционные автокомпенсаторы. Адаптивные решетчатые фильтры. – Х.: Прикладная радиоэлектроника. — 2016. — Т. 15, № 2 — С. 88–99.
- [3] Рябуха В.П. Адаптивные системы защиты РЛС от шумовых помех. 3. Математическая модель системы пространственной обработки сигналов в РЛС с двухмерной плоской ФАР – Х.: Прикладная радиоэлектроника. — 2016. — Т. 15, № 4 — С. 301–315.
- [4] Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория: Справочник/ Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, А.С. Малащенко, Д.И. Леховицкий, С.П. Леценко, Ю.И. Лосев, А.И. Николаев, С.А. Горшков, С.В. Москвитин, В.М. Орленко / Под ред. Я.Д. Ширмана. — М.: Радиотехника. — 2007. — 512 с.
- [5] Леховицкий Д.И. Защита многолучевых ФАР общей системой каналов компенсации / Д.И. Леховицкий, В.Н. Кокин, И.Д. Раков, Б.Г. Свердлов // Радиотехника. — 1987. — № 12. — С. 6–9.
- [6] Джиган В.И., Вечтомов В.А. Пространственная фильтрация помех в антенне, построенной из подрешеток / В.И. Джиган, В.А. Вечтомов // М.: Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». — 2012. — С. 158 – 171.
- [7] Абрамович Ю.И. Эффективность пространственной компенсации помех в системах с неидентичными каналами приема / Ю.И. Абрамович, В.Г. Качур, В.Н. Михайлюков // Радиотехника и электроника. — 1989. — Т. 34, №6. — С. 1196–1205.

Поступила в редколлегию 28.04.2017



Рябуха Вячеслав Петрович, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника отделения Государственного предприятия «Научно-исследовательский институт радиолокационных систем «Квант-Радиолокация». Область научных интересов – радиолокационные системы, обнаружение и измерение параметров сигналов на фоне помех.

УДК 621.396.965:621.391.26

Адаптивні системи захисту РЛС від шумових завад. 4. Вибір кількості, структури й місця розташування компенсаторних модулів у РЛС із плоскою ФАР / В.П. Рябуха // Прикладна радіоелектроніка: наук. – техн. журнал. – 2017. – Том 16, № 1, 2. – С. 3 – 12.

Четверта стаття циклу статей з адаптивних систем захисту РЛС від маскувальних шумових завад. На основі результатів математичного моделювання обґрунтовується кількість, структура й розташування системи компенсаторних каналів, що формуються з модулів 10000 – елементної плоскої квадратної ФАР з 625 (400, 100) модулями розміру 4×4 (5×5, 10×10) за наявності зважування вихідних сигналів модулів або елементів за законами Тейлора або Хеммінга або за його відсутності для ефективного виділення сигналів на тлі шумових завад. Оцінюється необхідний ступінь збільшення кількості таких каналів за наявності неідентичностей.

Ключові слова: плоска ФАР, шумові завади, компенсаторні модулі, закони Тейлора й Хеммінга, відношення сигнал/(завада + шум), неідентичності.

Табл.: 03. Іл.: 15. Бібліогр.: 07 найм.

UDC 621.396.965:621.391.26

Adaptive radar noise jamming protection systems. 4. The choice of quantity, structure and arrangement of compensation modules in a radar with a flat PAA. / V.P. Riabukha // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2017. –Vol. 16, № 1, 2. – P. 3 – 12.

This is the fourth article of a series of papers on adaptive radar masking-noise-jamming protection systems. On the basis of results of mathematical simulation, the paper substantiates quantity of compensation channels formed of modules of a 10,000-element flat square phased array antenna containing 625 (400,100) modules of the size 4×4 (5×5, 10×10), their arrangement and a structure of a system of the channels, either in the presence of weighing output signals of the modules (or elements) by Taylor's or Hamming's laws or in its absence, for effective detection of the signals embedded in noise jamming. A necessary degree of the increase in the number of such channels in the presence of nonidentities is estimated.

Keywords: flat PAA, noise jamming, compensation modules, Taylor's and Hamming's laws, signal-to-(interference + noise) ratio, nonidentities

Tab.: 03. Fig.: 15. Ref.: 07 items.