

А.А. БУЛАННЫЙ, Г.В. МАЙСТРЕНКО, А.А. СТРЕЛЬНИЦКИЙ, канд. техн. наук,  
В.М. ШОКАЛО, д-р техн. наук

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ И СПЕКТРАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ WI-FI КАНАЛОВ СВЯЗИ С ЛИНЕЙНЫМИ И ДВУМЕРНЫМИ АДАПТИВНЫМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕСКОЛЬКИХ ПОМЕХ И ОДНОГО СИГНАЛА

### Введение

Исследованию каналов связи с адаптивными антенными решетками (ААР) посвящено много работ (например, [1 – 4]), в которых описаны алгоритмы адаптации, а также схемы адаптивных антенн. Однако в этих работах пока не проведены детальные исследования малоэлементных ААР, которые нашли применение в рэлеевских Wi-Fi каналах связи. В частности, не изучены уровни помехозащищенности и производительности Wi-Fi каналов связи с малоэлементными линейными и двумерными адаптивными антенными решетками при воздействии нескольких помех и флуктуации направления их прихода. Частичная ликвидация этого пробела для частного случая прихода сигнала с направления близко к нормали ААР и является целью данной статьи.

### Постановка и решение задачи

Проведем исследование помехозащищенности и спектральной эффективности Wi-Fi каналов связи с линейными и двумерными ААР при воздействии нескольких помех и одного сигнала. Для этого будем использовать алгоритм, разработанный авторами для рэлеевских Wi-Fi каналов связи в [5]. Все расчеты проведем для случая изотропных излучателей и при условии, что мощность тепловых шумов по отношению к мощности помехи очень мала и ее можно пренебречь. При этом будем считать, что уровень помехозащищенности оценивается вероятностью битовой ошибки BER. Значение BER в рэлеевском канале связи для бинарной модуляции вычисляется по формуле [6]:

$$BER = \frac{1}{2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\rho}{\rho + 1}} \right),$$

где  $\rho$  – отношение сигнал-помеха (ОСП) рэлеевского канала связи на входе приемника.

Спектральная эффективность  $C_3$  рэлеевского канала определяется выражением [6]

$$C_3 = -\frac{1}{\ln 2} e^{\rho} \int_{-\infty}^{\rho} \frac{e^{-t}}{t} dt.$$

В качестве ОСП  $\rho$  будем принимать отношение мощностей приходящих полезного и помехового сигналов, умноженное на отношение значений полученной оптимальной диаграммы направленности (ДН) по мощности в направлении полезного и помехового сигналов

$$\rho = \frac{P_c}{P_n} \cdot \frac{F_c}{\sum_j F_{n_j}},$$

где  $\frac{P_c}{P_n}$  – отношение мощностей сигнала ( $P_c$ ) и помехи ( $P_n$ );  $F_c = F(\Theta_c, \varphi_c)$  – значение ДН по мощности в направлении полезного сигнала;  $\sum_j F_{n_j}$  – сумма по всем помехам ( $j=1,2,3$  значений ДН, усредненных по секторам флуктуации помеховых сигналов).

Так как в разработанном алгоритме направление прихода помехи является случайной величиной с известной плотностью распределения, то значение ДН в направлении помехового сигнала также является случайной величиной и его среднее значение вычисляется по формуле

$$F_{\Pi} = \int_{\Theta_{\Pi-\delta}}^{\Theta_{\Pi+\delta}} \int_{\varphi_{\Pi-\delta}}^{\varphi_{\Pi+\delta}} F(\varphi, \theta) \cdot g(\varphi, \theta) d\varphi d\theta,$$

где  $g(\varphi, \theta)$  – плотность распределения направления прихода помехи в секторе  $2\delta$ .

### Численные исследования

Исследования проводились на четырехэлементных антенных решетках – линейной и квадратной. Изменения формы ДН в зависимости от количества помех приведены на рис. 1.

Расчеты выполнялись для решеток с шагом  $d/\lambda=0,7$ . ДН линейной антенны изображены на рис.1, а – в, квадратной – рис.1, з – е.

Во всех примерах направление прихода сигнала  $\Theta_c$  было принято  $80^\circ$ , а направления прихода помех  $\Theta_{\Pi}$  были выбраны:  $20^\circ$  – для случая одной помехи;  $20^\circ$  и  $135^\circ$  – для случая двух помех;  $20^\circ$ ,  $135^\circ$  и  $40^\circ$  – для случая трех помех. Ширина секторов флуктуации помех одинакова для всех помех и равна  $\pm 3^\circ$ .

ДН адаптивной антенны, рассчитанные в присутствии помех, изображены на рис.1 сплошной линией, а штрих-пунктиром показаны оптимальные по максимуму ОСП ДН ААР без учета влияния помех.

Как видно из рисунков, форма ДН для данного угла прихода сигнала не существенно зависит от количества помех, и для того чтобы понять где хуже «работает» алгоритм адаптации, составлены табл. 1 – 3, в которых представлены итоговые параметры ААР. Проанализируем их.

Максимумы нормированных ДН по мощности в направлении прихода сигнала  $F(\Theta_c)$  в линейной и квадратной решетках отличаются менее чем на два порядка. Зато минимумы ДН в направлении прихода помех в случае одной помехи (см.табл.1) для квадратной ААР на четыре и более порядков меньше, чем для линейной ААР. Этим и определяется выигрыш в отношении сигнал/помеха  $\rho$  для квадратной антенны по сравнению с линейной. В свою очередь увеличение  $\rho$  приводит к существенному улучшению параметров BER и СЭ в квадратной решетке. Из табл. 1 следует, что квадратная ААР обеспечивает высокое качество передачи информации ( $BER < -40$  дБ) при любом шаге решетки  $d/\lambda$ . С помощью же линейной ААР реализуется только среднее качество с  $BER < -20$  дБ, при этом производительность канала уменьшается практически в два с половиной раза по сравнению со случаем применения квадратной ААР.

Таблица 1

Тип антенн	Линейная ААР	Квадратная ААР	Линейная ААР	Квадратная ААР	Линейная ААР	Квадратная ААР	Линейная ААР	Квадратная ААР
$d/\lambda$	0.3		0.5		0.7		1.0	
$F_c$	0.95	0.02	1	0.41	1	0.20	0.73	0.11
$F_{\Pi}$	$9.32 \times 10^{-4}$	$1.11 \times 10^{-9}$	$8.12 \times 10^{-4}$	$2.62 \times 10^{-8}$	$8.81 \times 10^{-4}$	$1.90 \times 10^{-8}$	$9.70 \times 10^{-4}$	$5.46 \times 10^{-8}$
$\rho$ , дБ	30.07	72.52	30.90	71.99	30.54	70.27	28.75	62.86
BER, дБ	-36.09	-78.54	-36.93	-78.01	-36.56	-76.29	-34.78	-68.88
$C_{\Sigma}$ , $\frac{\text{бит}}{\text{с} \cdot \text{Гц}}$	9.17	23.26	9.44	23.08	9.32	22.51	8.73	20.05

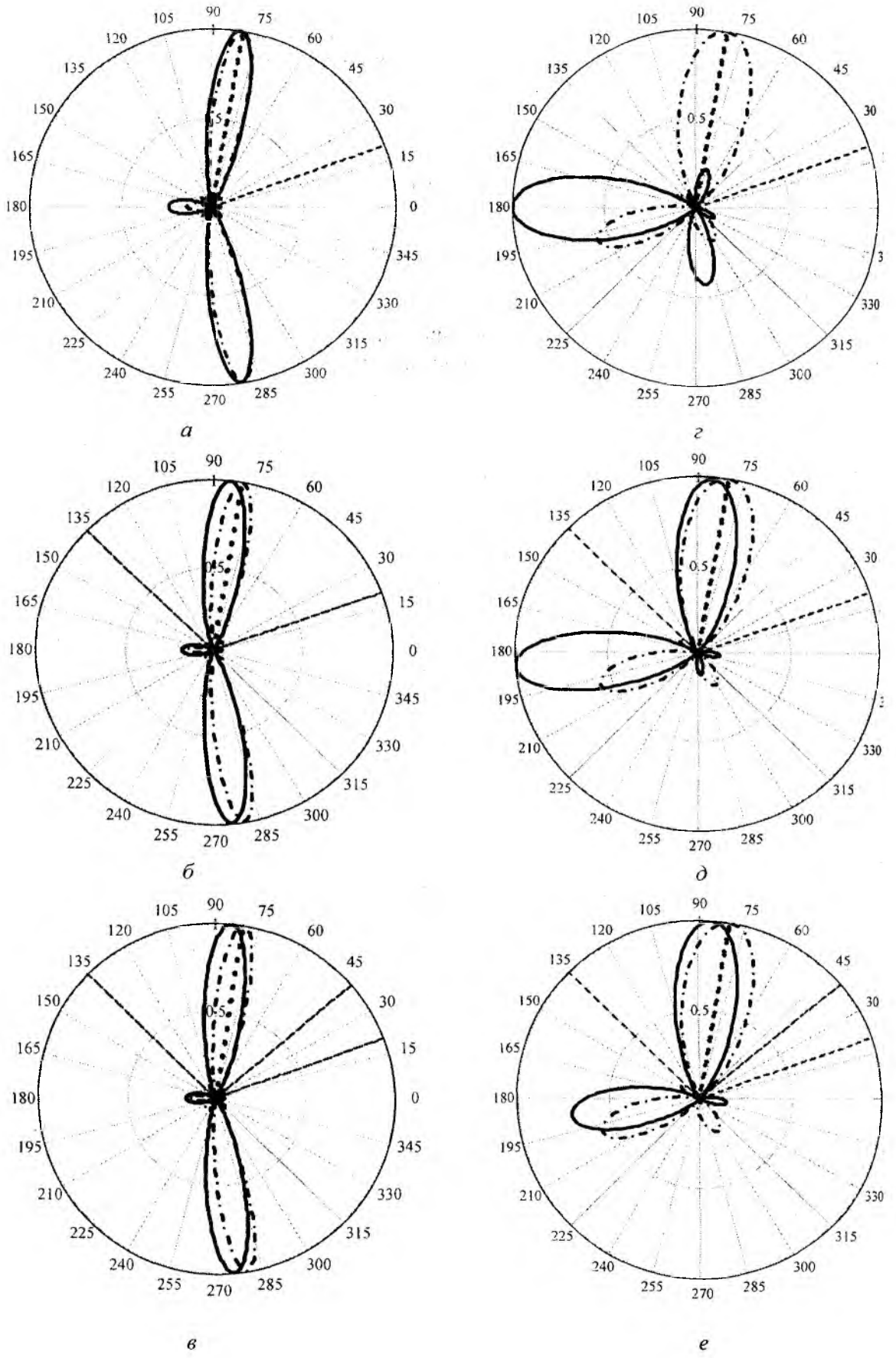


Рис.1. ДН линейной и квадратной ААР с шагом решетки  $d/\lambda=0.7$  при направлении полезного сигнала  $\theta_c = 80^\circ$  и разного количества помех (одной помехи – а, з, двух помех – б, д, трех помех – в, е)

Ситуация существенно изменяется при воздействии двух (табл. 2) и трех (табл. 3) помех. Как видно из табл. 2, 3, с ростом числа помех значения  $F_{П}$  увеличиваются, что приводит к уменьшению величины BER, особенно в квадратной ААР. При этом линейная и квадратная ААР обеспечивают достижение только среднего качества передачи информации.

Таблица 2

Тип антенн	Линейная ААР	Квадратная ААР	Линейная ААР	Квадратная ААР	Линейная ААР	Квадратная ААР	Линейная ААР	Квадратная ААР
$d/\lambda$	0.3		0.5		0.7		1.0	
$F_C$	0.98	0.25	1	0.84	0.93	0.94	0.10	0.61
$F_{П1}$	$1.62 \times 10^{-3}$	$1.14 \times 10^{-3}$	$9.30 \times 10^{-4}$	$5.99 \times 10^{-4}$	$9.27 \times 10^{-4}$	$1.08 \times 10^{-3}$	$4.91 \times 10^{-3}$	$9.59 \times 10^{-3}$
$F_{П2}$	$1.16 \times 10^{-3}$	$1.76 \times 10^{-4}$	$8.97 \times 10^{-4}$	$6.57 \times 10^{-4}$	$9.33 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^{-5}$	$2.77 \times 10^{-3}$	$8.22 \times 10^{-4}$
$\rho$ , дБ	29.29	22.81	28.38	28.28	27.00	29.35	11.05	17.67
BER, дБ	-31.51	-28.85	-33.41	-34.30	-33.03	-35.37	-17.32	-23.75
$C_{Э}$ , $\frac{\text{бит}}{\text{с} \cdot \Gamma\text{ц}}$	7.66	6.79	8.28	8.58	8.16	8.93	3.19	5.15

Таблица 3

Тип антенн	Линейная ААР	Квадратная ААР	Линейная ААР	Квадратная ААР	Линейная ААР	Квадратная ААР	Линейная ААР	Квадратная ААР
$d/\lambda$	0.3		0.5		0.7		1.0	
$F_C$	0.67	0.04	0.80	0.81	0.92	0.94	0.39	0.24
$F_{П1}$	$1.93 \times 10^{-3}$	$1.57 \times 10^{-5}$	$9.00 \times 10^{-4}$	$2.34 \times 10^{-4}$	$9.31 \times 10^{-4}$	$1.23 \times 10^{-3}$	$5.38 \times 10^{-3}$	$9.88 \times 10^{-4}$
$F_{П2}$	$6.01 \times 10^{-3}$	$5.71 \times 10^{-4}$	$1.17 \times 10^{-3}$	$1.81 \times 10^{-3}$	$9.27 \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-3}$	0.03	$5.75 \times 10^{-3}$
$F_{П3}$	$1.92 \times 10^{-3}$	$2.80 \times 10^{-5}$	$9.62 \times 10^{-4}$	$4.69 \times 10^{-4}$	$9.15 \times 10^{-4}$	$2.07 \times 10^{-3}$	$7.17 \times 10^{-3}$	$1.23 \times 10^{-3}$
$\rho$ , дБ	18.29	17.96	24.20	25.07	25.22	23.36	9.65	14.72
BER, дБ	-24.36	-24.03	-30.23	-31.10	-31.25	-29.40	-16.00	-20.85
$C_{Э}$ , $\frac{\text{бит}}{\text{с} \cdot \Gamma\text{ц}}$	5.34	5.24	7.24	7.52	7.57	6.97	2.81	4.25

Так как приведенные в табл. 2, 3 данные получены при ОСП входящих сигналов равном единице, данные для BER при других значениях ОСП на входе ААР сведены в табл. 4.

С ростом ОСП значения BER улучшаются и можно определить те значения ОСП на входе решетки, при которых обеспечивается не только среднее и высокое качество передачи информации в канале.

Важно знать зависимость BER от ширины зоны флуктуации помехи  $2\delta$ . Эти графики изображены на рис. 2 (при воздействии одной помехи), на рис. 3 (при воздействии двух помех) и на рис. 4 (при воздействии трех помех). Квадратная решетка явно выигрывает в случае одной помехи. При этом высокое качество передачи информации обеспечивается до величины  $\delta \approx 17^\circ$  (см. рис. 2). Линейная же ААР позволяет реализовать только среднее качество передачи информации ( $BER > -40\text{дБ}$ ) во всем диапазоне углов  $\delta$  от  $1^\circ$  до  $20^\circ$ .

		Линейная ААР				Квадратная ААР			
$d/\lambda$	ОСП	1	10	100	1000	1	10	100	1000
	При воздействии одной помехи								
0,3		-36.09	-46.09	-56.09	-66.09	-78.54	-88.54	-98.54	-108.54
0,5		-36.93	-46.93	-56.93	-66.93	-78.01	-88.01	-98.01	-108.01
0,7		-36.56	-46.56	-56.56	-66.56	-76.29	-86.29	-96.29	-106.29
1,0		-34.78	-44.77	-54.77	-64.77	-68.88	-78.88	-88.88	-98.88
При воздействии двух помех									
0,3		-31.51	-41.50	-51.50	-61.50	-28.85	-38.84	-48.84	-58.84
0,5		-33.41	-43.41	-53.41	-63.41	-34.30	-44.30	-54.30	-64.30
0,7		-33.03	-43.02	-53.02	-63.02	-35.37	-45.37	-55.37	-65.37
1,0		-17.32	-27.10	-37.01	-47.01	-23.75	-33.70	-43.69	-53.69
При воздействии трёх помех									
0,3		-24.36	-34.32	-44.31	-54.31	-24.03	-33.99	-43.98	-53.98
0,5		-30.23	-40.22	-50.22	-60.22	-31.10	-41.09	-51.09	-61.09
0,7		-31.25	-41.24	-51.24	-61.24	-29.40	-39.38	-49.38	-59.38
1,0		-16.00	-25.7	-35.67	-45.68	-20.85	-30.76	-40.75	-50.74

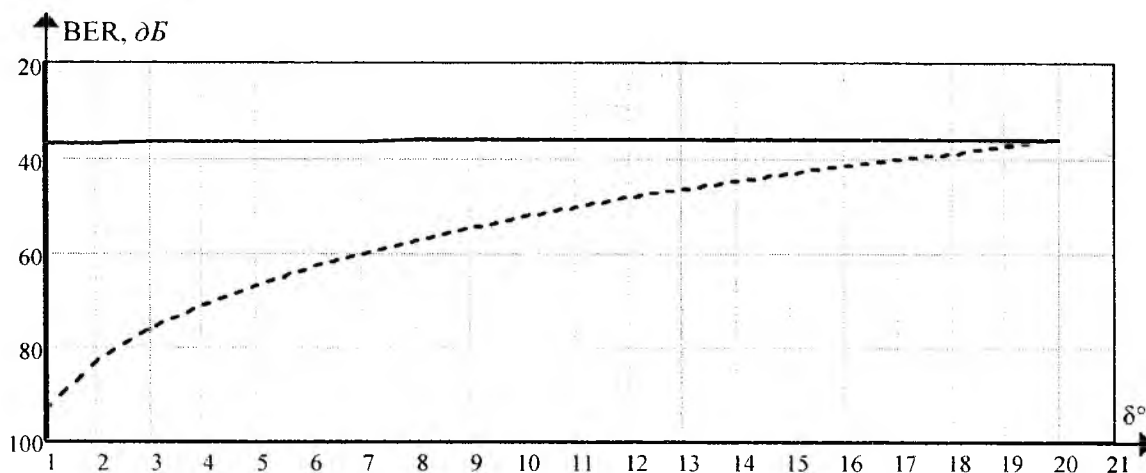


Рис. 2. Зависимость BER для линейной ААР (сплошная линия) и квадратной ААР (пунктирная линия) при воздействии одной помехи

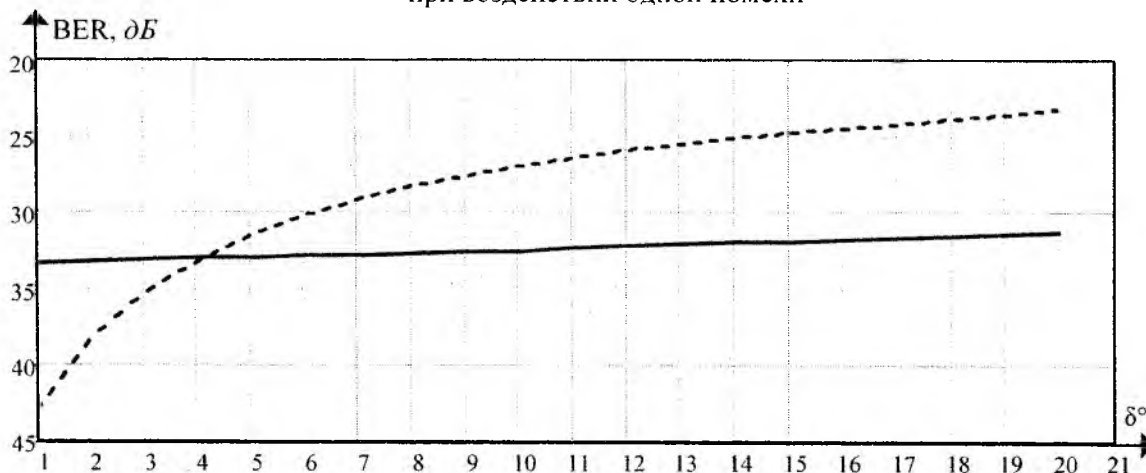


Рис. 3. Зависимость BER для линейной ААР (сплошная линия) и квадратной ААР (пунктирная линия) при воздействии двух помех

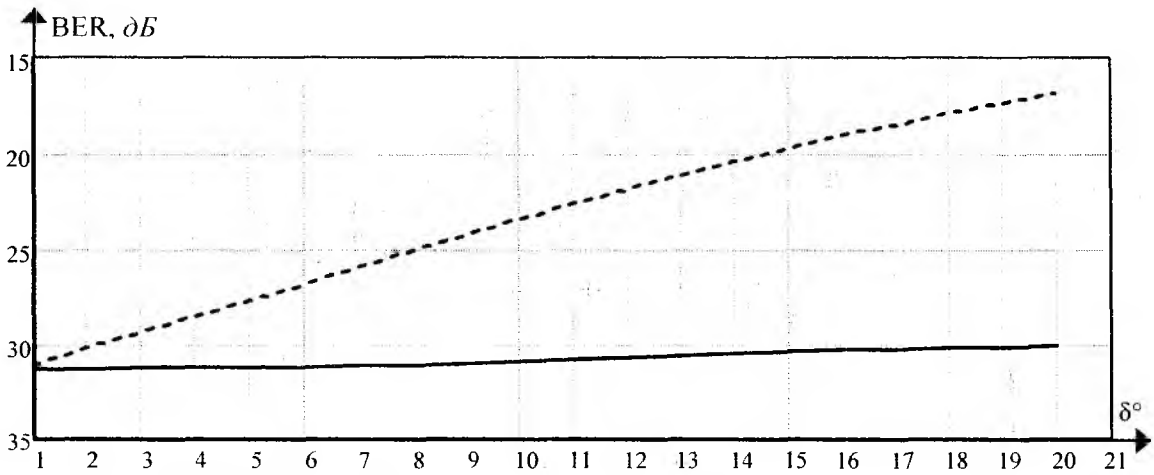


Рис.4. Зависимость BER для линейной ААР (сплошная линия) и квадратной ААР (пунктирная линия) при воздействии трех помех

Как уже отмечалось, при воздействии двух помех канал связи с квадратной ААР имеет величину BER соответствующую среднему качеству передачи информации (см.рис.3) и при  $\delta > 4^\circ$  проигрывает линейной ААР, которая позволяет достичь при  $1^\circ \leq \delta \leq 20^\circ$  качество передачи информации не хуже – 33 дБ. В случае же трех помех, величина BER еще ухудшится и для квадратной ААР при значении сектора флуктуации помехи  $\delta$  от  $15^\circ$  до  $20^\circ$  соответствует только низкому качеству передачи информации. Ситуация может быть улучшена только за счет увеличения ОСП более чем в 10 раз.

Сопоставляя достоинства и недостатки линейных и двумерных ААР, необходимо обсудить вопрос о сложности их технической реализации. Для этого следует сравнить амплитудно-фазовые распределения (АФР) обеих решеток (см.табл.5,6). В таблицах через  $A_i$  обозначены значения нормированных амплитуд на входах излучателей а через  $\varphi_i$  – значения фаз. Нетрудно сделать вывод, что оба варианта ААР одинаковы по сложности реализации, т.к. и в том, и в другом случае требуется обеспечение не только заданного фазового, но и амплитудного распределения.

Таблица 5

$d/\lambda$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$
При воздействии одной помехи								
0,3	0.95	1	1	0.95	4,32	0	22,70	18,38
0,5	0.64	1	1	0.64	0	15,36	70,70	86,06
0,7	0.48	1	1	0.48	0	44,32	76,06	123,38
1,0	0.86	1	1	0.86	232,57	0	40,26	163,69
При воздействии двух помех								
0,3	1	0.98	0.98	1	337,00	54,35	0	77,35
0,5	0.39	1	1	0.39	0	32,22	61,32	93,55
0,7	0.36	1	1	0.36	0	26,33	53,24	76,56
1,0	0.85	1	1	0.85	0	277,91	129,48	47,39
При воздействии трёх помех								
0,3	1	0.98	0.98	1	0	267,89	27,47	295,35
0,5	0.43	1	1	0.43	0,02	0	3,75	3,73
0,7	0.37	1	1	0.37	0	24,76	50,58	75,36
1,0	1	0.81	0.81	1	0	142,52	31,92	174,43

$d/\lambda$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_3$	$\varphi_4$
При воздействии одной помехи								
0,3	1	0.85	1	0.85	147.88	60.97	0	86.91
0,5	1	0.72	1	0.72	36.39	0	10.19	46.58
0,7	1	0.64	1	0.64	282.33	288.91	6.59	0
1,0	1	0.57	1	0.57	183.27	245.31	62.04	0
При воздействии двух помех								
0,3	1	0.89	1	0.89	141.97	0	84.83	226.80
0,5	1	0.90	1	0.90	105.66	0	41.39	147.04
0,7	0.83	1	0.83	1	322.76	286.51	323.75	0
1,0	0.27	1	0.27	1	264.90	0	140.76	45.66
При воздействии трёх помех								
0,3	1	0.97	1	0.97	176.02	72.21	0	103.81
0,5	1	0.96	1	0.96	63.09	6.38	0	56.71
0,7	0.85	1	0.85	1	332.32	278.04	305.72	0
1,0	1	0.85	1	0.85	149.47	268.57	69.05	0

## Выводы

Для частного случая прихода сигнала с направления близко к нормали ААР получены новые результаты сравнительного анализа помехозащищенности и спектральной эффективности Wi-Fi каналов связи с малоэлементными линейными и квадратными ААР, которые заключаются в следующем:

- показано, что при воздействии одной помехи на ААР канал связи с квадратной решеткой существенно выигрывает по параметрам BER и СЭ по сравнению со случаем использования линейной ААР за счет реализации более глубоких нулей ДН в направлении прихода помехи;
- предложена модель расчета BER и СЭ при воздействии нескольких помех, основанная на предположении, что помехи являются аддитивными, они имеют одинаковый равномерный закон распределения прихода помехи в секторе  $(\Theta_{\Pi} \pm \delta)$ ,  $1^\circ \leq \delta \leq 20^\circ$ .
- с использованием предложенной модели расчетным путем выяснено, что в случае воздействия нескольких помех нули в ДН квадратных ААР "заплывают" больше, чем в линейных, что приводит к более плохим результатам по качеству передаваемой информации и производительности канала.

**Список литературы:** 1. Уидроу, Б., Стирнз, С. Адаптивная обработка сигналов : пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1989. – 440 с. 2. Титаренко, Л.А. Адаптивная пространственная обработка сигналов в условиях априорной неопределенности. – Х. : ХНУРЭ; Коллегиум, 2004. – 216с. 3. Быховский, М.А. Приём широкополосных сигналов с помощью адаптивных антенн // Мобильные системы. – 2006. – №8. – С. 21-27. 4. Дурманов, М.А., Широков, И.Б. Адаптивная антенная система базовой станции стандарта GSM 900 // Электроника и связь. – 2009. – Вып. 1(48). – С. 76-81. 5. Майстренко, Г.В., Рыбалко, А.М., Стрельницкий, А.А., Шокало, В.М. Влияние случайного изменения направления прихода помехи на помехозащищенность Wi-Fi канала связи с адаптивными антеннами // Радиотехника. – 2012. – Вып. 169. – С. 168-175. 6. Ермолаев, В.Т., Флакман, А.Г. Теоретические основы обработки сигналов в системах мобильной радиосвязи. – Режим доступа: <http://www.unn.ru/pages/e-library/methodmaterial/files/56.pdf>.