

## ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ И СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЭЛЕЕВСКИХ WI-FI КАНАЛОВ СВЯЗИ ПРИ ФЛУКТУАЦИИ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА ПОМЕХИ

В работе исследуется помехозащищенность и спектральная эффективность рэлеевского Wi-Fi канала связи с линейной малоэлементной адаптивной антенной решеткой, в алгоритме адаптации которой учитывается, что направление прихода помехи может флуктуировать в определенном секторе углов. Известно, что при случайном изменении направления прихода помехи качество работы Wi-Fi канала связи ухудшается. Однако в опубликованных работах пока нет данных о степени влияния этих изменений. Выявление закономерностей и степени влияния этих изменений и является целью данной статьи.

**Ключевые слова:** связь, канал связи, антенная решетка, помеха.

**Введение.** Одной из задач при передачи мультимедийной информации по Wi-Fi каналам связи является обеспечение помехоустойчивости этих каналов на уровне вероятности битовой ошибки  $BER = 10^{-4} - 10^{-6}$  при приемлемой спектральной эффективности  $C_{\Sigma}$ .

Известно, что при наличии преднамеренной или непреднамеренной помехи помехозащищенность каналов связи уменьшается. Перспективным способом борьбы с помехами является применение адаптивных антенных решеток (ААР), использующих фазокомпенсационный метод адаптации [1]. Особенность этого метода состоит в необходимости знания направления прихода помехи  $\theta n$ . По многим причинам направление прихода помехи может флуктуировать в определенном секторе углов шириной  $2\delta$ . Например, неточное определение  $\theta n$  может быть вызвано перемещением источника помех, многолучевостью или погрешностью его измерения.

Нетрудно предположить, что флуктуации угла прихода помехи вызовут ошибки в работе алгоритма адаптации при формировании нуля диаграммы направленности антенны в направлении прихода помехи. Это приведет к уменьшению отношения сигнал-помеха (ОСП) на входе приемника с адаптивной антенной решеткой, а, следовательно, и к ухудшению величины  $BER$  и  $C_{\Sigma}$ . Алгоритм адаптации, учитывающий влияние флуктуации направления прихода помехи в секторе  $2\delta$ , разработан в [2]. Однако детальные исследования помехозащищенности и производительности каналов связи с адаптивными антенными решетками проведены не были.

Цель данной работы состоит в изучении с помощью алгоритма, разработанного в [2], ранее неизвестных закономерностей изменения параметров  $BER$  и  $C_{\Sigma}$  рэлеевского (многолучевого) Wi-Fi канала с адаптивной антенной (АР) при случайном изменении направления прихода помехи.

**Расчетные соотношения и результаты.** В многолучевом Wi-Fi канале, который рассматривается в статье, коэффициент передачи распределен по рэлеевскому закону. При этом случайные ОСП, обозначим его  $\rho$ , имеют экспоненциальную плотность распределения, а вероятность битовой ошибки  $BER(\rho)$  определяется следующим выражением [3]:

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

В [3] выведена формула и для производительности (спектральной эффективности) рэлеевского канала  $C_{\Sigma}$ :

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

Таким образом, при известной величине ОСП параметры канала связи  $BER$  и  $C_{\Sigma}$  легко определяются.

Для вычисления оптимальной величины ОСП, достигаемой в результате адаптации, будем использовать алгоритм, описанный в работе [2]. Основные положения этого алгоритма следующие:

- направление прихода помехи  $\theta n$  является случайной величиной, которая изменяется в интервале  $[\theta n - \delta, \theta n + \delta]$ ;
- входной сигнал ААР обрабатывается при помощи вектора весовых коэффициентов (ВВК) таким образом, чтобы сформировать ноль ДН в направлении прихода помехи и максимум в направлении прихода полезного сигнала;
- алгоритм нахождения оптимального ВВК использует метод обращения ковариационной матрицы.

В [2] показано, что по описанному значению ВВК величина максимального ОСП  $\rho_{max}$  определяется таким образом:

$$\rho_{max} = \Phi(\vec{W}_{opt}) = |f(\vec{u}_s)|^2 \frac{\bar{P}_s}{\bar{P}_j} (A_n^{-1} \cdot \vec{V}_s, \vec{V}_s),$$

где  $f(\vec{u}_s)$  – ДН элемента решетки;  $\bar{P}_s(\bar{P}_j)$  – среднее значение мощности за период полезного (помехового) сигнала;  $\vec{V}_s = (\exp(ik\vec{r}_1 \cdot \vec{u}_s), \exp(ik\vec{r}_2 \cdot \vec{u}_s), \dots, \exp(ik\vec{r}_N \cdot \vec{u}_s))$  – вектор фазового набега входных сигналов, обусловленного пространственным разнесением элементов;  $N$  – число элементов АР;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\vec{r}_m (m = \overline{1, N})$  – радиус-вектор положения  $m$ -го элемента в выбранной системе координат;  $\vec{u}_s = (\cos\varphi_s \cdot \sin\theta_s, \sin\varphi_s \cdot \sin\theta_s, \cos\theta_s)$  – единичный вектор направления прихода полезного сигнала;  $\varphi_s, \theta_s$  – соответственно азимутальный угол и угол места, отсчитываемый от оси OZ;  $A_n^{-1} = (A + (\sigma_n^2 / \bar{P}_j) \cdot E)^{-1}$ , здесь  $E$  – единичная матрица;  $A = \|a_{mn}\|_{m,n=1}^N$  – эрмитово положительная матрица с элементами:

$$a_{mn} = \sum_{l=1}^L \int_{\Omega_j} |f(\vec{u})|^2 \cdot \exp\{i \cdot k \cdot (\vec{r}_n - \vec{r}_m) \cdot \vec{u}\} \cdot g_l(\varphi, \theta) \cdot d\Omega, \text{ здесь } g_l(\varphi, \theta), (l = \overline{1, L}) \text{ законы распределения углов прихода помехи в каждой из зон, заданные в виде плотности распределения; } d\Omega \text{ – элемент телесного угла; } \Omega_l \text{ – зоны (телесные углы) прихода помехи; } L(1 \leq L < N) \text{ –}$$

количество зон прихода помех;  $\sigma_n^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_{ii}$  – суммарная мощность шума АР,  $\sigma_{ii}$  – мощность шума  $i$ -го канала;

Расчеты проводились для малоэлементных антенных решеток с шагом между элементами равным  $0,5\lambda$  и отношением ОСП на входе решетки равным 1. Направления прихода сигнала  $\theta c$  и помехи  $\theta n$  равны  $20^\circ$  и  $80^\circ$  соответственно. Полученные результаты представлены в табл.1. Здесь через  $F(\theta c)$  и  $F(\theta n)$  обозначены нормированные значения диаграммы направленности антенны в направлениях  $\theta c$  и  $\theta n$ .

Данные в табл.1 показывают закономерное убывание таких параметров канала связи, как вероятность битовой ошибки и спектральная эффективность, с ростом величины  $\delta$ . Для двухэлементной АР виден существенный рост значения ДН в направлении прихода сигнала с увеличением сектора  $\delta$ , однако он не приносит желаемого увеличения ОСП, потому, что значения ДН в направлении прихода помехи растут быстрее. Пятиэлементная АР за счет многолепестковости ДН позволяет нейтрализовать ухудшение BER и  $C_{\Sigma}$  при малых значениях  $\delta$ , однако при увеличении  $\delta$  более  $10^\circ$  снижение этих параметров обусловлено ростом величины  $F(\theta n)$ .

Таким образом величина BER зависит от ширины сектора прихода помехи довольно значительно, что вызывает необходимость детальных исследований влияния величины флуктуации направления прихода помехи на такие характеристики канала связи как

вероятность битовой ошибки и спектральная эффективность. Результаты этих исследований приведены на рис. 1 – 5 и в табл. 2 – 3.

Значения ОСП, BER,  $C_{\Sigma}$  на выходе линейной ААР при изменении сектора флуктуации помехи  $\delta$ .

Таблица 1

$N$	2				3				4				5			
	3	5	7	10	3	5	7	10	3	5	7	10	3	5	7	10
$F(\theta_c)$	0,872	0,873	0,876	0,880	0,770	0,764	0,763	0,763	1	0,933	0,790	0,700	1	1	0,999	0,964
$F(\theta_n)$	$1,52 \times 10^{-4}$	$1,62 \times 10^{-4}$	$1,94 \times 10^{-4}$	$3,31 \times 10^{-4}$	$1,17 \times 10^{-4}$	$1,49 \times 10^{-4}$	$2,50 \times 10^{-4}$	$6,72 \times 10^{-4}$	$0,89 \times 10^{-4}$	$1,06 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-4}$	$0,97 \times 10^{-4}$	$6,98 \times 10^{-5}$	$6,96 \times 10^{-5}$	$6,93 \times 10^{-5}$	$7,11 \times 10^{-5}$
$\rho$ , дБ	37,60	37,32	36,54	34,25	38,18	37,11	34,84	30,54	40,50	39,45	38,85	38,60	41,56	41,57	41,59	41,33
BER, дБ	-43,62	-43,35	-42,56	-40,28	-44,20	-43,13	-40,86	-36,58	-46,52	-45,47	-44,87	-44,62	-47,59	-47,60	-47,61	-47,35
$C_{\Sigma}$ , бит/с·Гц	11,66	11,57	11,31	10,55	11,85	11,50	10,75	9,33	12,62	12,27	12,07	11,99	12,98	12,98	12,98	12,90

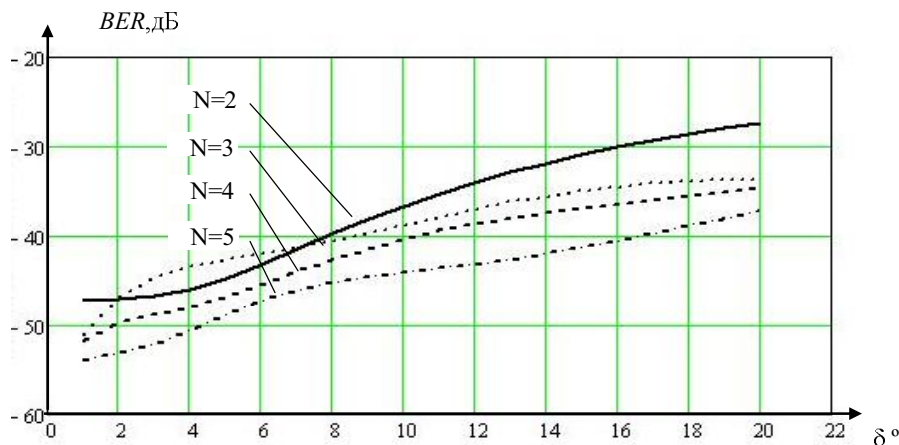


Рис. 1. Зависимость BER для ААР с различным количеством элементов и с расстоянием между ними  $d/\lambda = 0,5$  при направлении прихода полезного сигнала  $\theta_c = 20^\circ$ , направлении прихода помехи  $\theta_n = 50^\circ$  и ОСП на входе решетки равным 10 от величины сектора флуктуации помехи  $\delta$ .

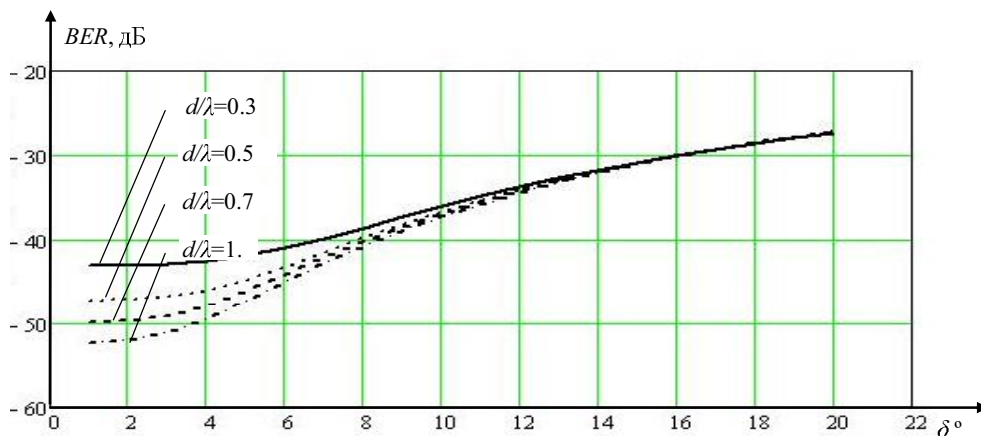


Рис. 2. Зависимость BER для двухэлементной ААР с различными значениями расстояния между элементами  $d/\lambda$  при направлении прихода полезного сигнала  $\theta_c = 20^\circ$ , направлении прихода помехи  $\theta_n = 50^\circ$  и ОСП на входе решетки равным 10 от величины сектора флуктуации помехи  $\delta$ .

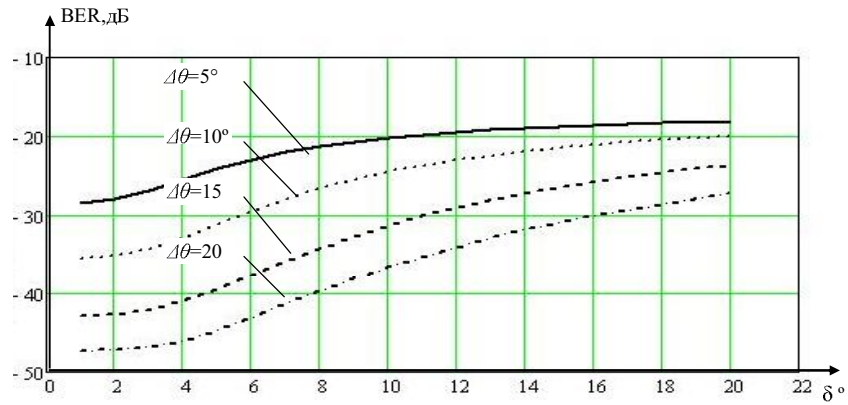


Рис. 3. Зависимость  $BER$  для двухэлементной ААР с расстояния между элементами  $d/\lambda = 0,5$ , при направлении прихода полезного сигнала  $\theta_c = 20^\circ$ , ОСП на входе решетки равным 10 с различными значениями разности  $\Delta\theta$  между углами прихода сигнала и помехи от величины сектора флуктуации помехи  $\delta$ .

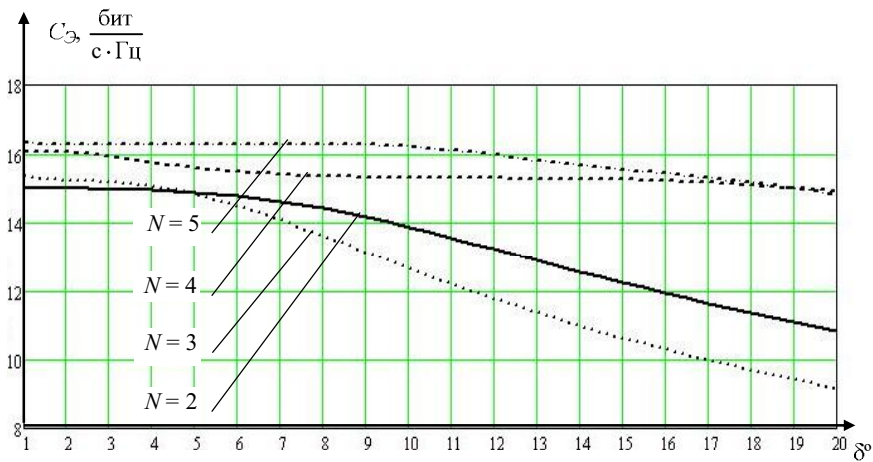


Рис. 4. Зависимость  $C_3$  для ААР с различным количеством элементов и с расстоянием между ними  $d/\lambda = 0,5$  при направлении прихода полезного сигнала  $\theta_c = 20^\circ$ , направлении прихода помехи  $\theta_n = 80^\circ$  и ОСП на входе решетки равным 10 от величины сектора флуктуации помехи  $\delta$ .

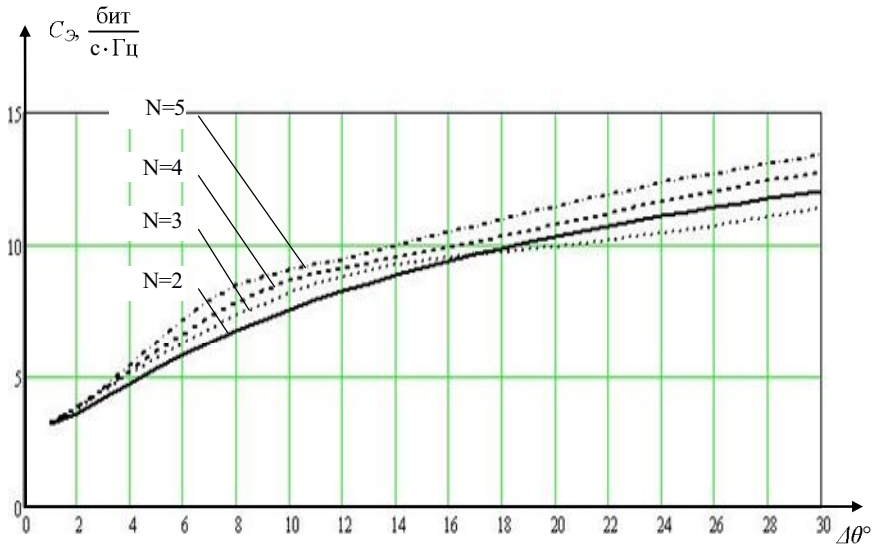


Рис. 5. Зависимость  $C_3$  для ААР с различным количеством элементов и с расстоянием между ними  $d/\lambda = 0,5$  при направлении прихода полезного сигнала  $\theta_c = 20^\circ$ , величине сектора флуктуации помехи  $\delta = 5^\circ$ , и ОСП на входе решетки равным 10 от разности между направлениями прихода помехи и сигнала  $\Delta\theta$

Таблица 2

Значения BER и СЭ для ААР с различным количеством элементов и с расстоянием между ними  $d/\lambda = 0,5$ , направлением прихода полезного сигнала  $\theta_c = 20^\circ$ , направлением прихода помехи  $\theta_p = 80^\circ$  ( $\Delta\theta = 60^\circ$ ), с ОСП на входе решетки равным 10 при изменении величины сектора флуктуации помехи  $\delta$ .

N	2				3				4				5			
	3	5	7	10	3	5	7	10	3	5	7	10	3	5	7	10
BER, дБ	-53,62	-53,34	-52,56	-50,27	-54,2	-53,13	-50,86	-46,58	-56,52	-55,47	-54,87	-54,62	-57,58	-57,59	-57,60	-57,34
$\frac{C_{\Sigma}}{\text{бит}} / \text{сЧГЦ}$	14,98	14,89	14,63	13,86	15,17	14,81	14,06	12,64	15,94	15,59	15,39	15,31	16,29	16,30	16,31	16,22

Таблица 3

Значения BER и СЭ для ААР с различным количеством элементов и с расстоянием между ними  $d/\lambda = 0,5$ , направление прихода полезного сигнала  $\theta_c = 20^\circ$ , с ОСП на входе решетки равным 10, сектором флуктуации помехи  $\delta = 5^\circ$  при различных значениях  $\Delta\theta$ .

N	2				3				4				5			
	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
BER, дБ	-24,15	-31,16	-35,94	-39,52	-25,46	-33,05	-36,82	-38,37	-26,17	-34,51	-37,66	-40,87	-27,37	-35,72	-39,28	-43,03
$\frac{C_{\Sigma}}{\text{бит}} / \text{сЧГЦ}$	5,27	7,54	9,12	10,3	5,69	8,16	9,41	9,92	5,92	8,64	9,68	10,75	6,31	9,04	10,22	11,46

Из анализа полученных результатов следует, что величины BER и СЭ изменяются в широких пределах в зависимости от количества элементов ААР  $N$ , расстояния между элементами  $d/\lambda$ , разности между направлениями прихода сигнала и помехи  $\Delta\theta$ .

В ряде случаев уже при  $\delta = 8^\circ$  величина  $BER > -40$  дБ и канал связи не удовлетворяет требованиям высокого качества передачи информации (см. рис. 1 – 4). При этом, если величина  $\Delta\theta$  значительна, то и спектральная эффективность канала большая (табл. 2), а при малых значениях  $\Delta\theta$  величина СЭ резко снижается, т.е. канал может и не удовлетворять требованиям по производительности (скорости передачи информации) (табл. 3).

**Выводы.** Получены новые знания о степени влияния флуктуаций угла прихода помехи на помехозащищенность и производительность рэлеевского канала связи с линейными малозоментными ААР. Установлена взаимосвязь величины флуктуаций угла прихода помехи  $\delta$  с формой ДН, параметрами ААР и канала связи. Показано, что с увеличением  $\delta$  в диаграмме направленности увеличивается лепесток в направлении прихода помехи, что приводит к уменьшению ОСП, ухудшению BER и снижению производительности канала.

## ЛИТЕРАТУРА

- Гевеля Н.П., Истрашкин А.Д., Муравьев Ю.К., Серов В.П. Антенны, ч.2, Ленинград, 1963
- 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: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2012. Вып. 169. С. 168 — 175.
- Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. Теоретические основы обработки сигналов в системах мобильной радиосвязи. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.unn.ru/pages/e-library/methodmaterial/files/56.pdf>

Надійшла: 12.09.2012р.

Рецензент: д.т.н., проф. Щербак Л.М.