

УДК 621.396.93

## ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ МІМО ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОВЫБОРА АНТЕНН НА БАЗОВОЙ И АБОНЕНТСКОЙ СТАНЦИЯХ

М.А. Быховский, главный научный сотрудник ФГУП НИИР, д.т.н.; bykhmark@gmail.com

**Ключевые слова:** автовыбор антенн, система МІМО, система Аламоути, кратность разнесения.

**Введение.** Актуальной проблемой радиосвязи, связанной, в частности, с проблемой повышения эффективности использования весьма дефицитного ресурса – радиочастотного спектра, является увеличение помехоустойчивости и скорости передачи данных в многолучевых радиоканалах. Эта проблема актуальна как в системах сотовой подвижной связи и широкополосного беспроводного доступа, в которых множество абонентов обслуживаются одной базовой станцией (БС), так и в системах телерадиовещания. При создании таких систем особое внимание уделяется абонентской станции (АС) (или вещательному приемнику), которая должна быть предельно простой, иметь малое энергопотребление и малые габариты.

Для решения этой проблемы были предложены системы МІМО (Multiple Input Multiple Output). В них на передающем и приемном концах линии связи применяются несколько разнесенных в пространстве антенн. Исследования таких систем обусловили разработку пространственно-временных кодов (ПВК) [1], позволяющих в максимально-возможной степени повысить помехоустойчивость приема сигналов, с тем, чтобы при независимых релейских замираниях коэффициентов передачи между каждой из антенн БС и АС вероятность ошибочного приема выражалась зависимостью

$$P_{er} \approx \frac{\alpha(K_{BC}, K_{AC}, M)}{h^{2K_{BC}K_{AC}}}. \quad (1)$$

В (1)  $\alpha(K_{BC}, K_{AC}, M)$  – коэффициент, зависящий от количества применяемых антенн на БС ( $K_{BC}$ ) и на АС ( $K_{AC}$ ), а также от позиционности ( $M$ ) используемого для передачи сигналов вида модуляции (в данной работе рассматривается квадратурно-амплитудная модуляция КАМ-М);  $h^2$  – отношение мощности сигнала, принимаемого в одной ветви разнесения, к мощности шума в полосе частот, равной  $1/T$ , где  $T$  – длительность одного информационного символа. Величина  $K_{BC}K_{AC}$  называется кратностью разнесения. Чем больше кратность разнесения, тем большую помехоустойчивость приема может обеспечить система МІМО.

Первая система с ПВК, в которой имелись две передающие ( $K_{BC}=2$ ) и одна приемная ( $K_{AC}=1$ ) антенны, была предложена в 1998 г. американским ученым Аламоути [1]. В этой системе на вход установленного в передатчике блока ПВК Аламоути последовательно поступали сигналы  $S_1(t)$  и  $S_2(t)$  и т.д. (например, сигналы КАМ-М). Блок имел два выхода 1 и 2. Поступающие на его вход сигналы разбивались на пары и в течение двух последовательных тактов времени подвергались следующим преобразованиям: в течение первого такта на выходе 1 появлялся сигнал  $S_1^*(t)$ , а на выходе 2 – сигнал  $S_2^*(t)$ ; в течение второго такта на выходе 1 появлялся сигнал  $S_2^*(t)$ , а на выходе 2 – сигнал  $S_1^*(t)$  (здесь  $S_1^*(t)$  – сигнал, комплексно-сопряженный с сигналом  $S(t)$ ). Сигналы, действующие на выходе 1 блока ПВК, поступали на вход одной из передающих антенн, а действующие на выходе 2 – на вход

другой передающей антенны. Таким образом, в системе Аламоути сообщения всегда излучаются в эфир одновременно двумя передающими антеннами. Причем, даже в том случае, если коэффициент передачи  $h$  между одной из антенн БС и антенной АС оказывается из-за замираний близким к нулю, оба переданных БС сигнала в течение двух тактов передачи поступают на АС с другой антенны БС. Поскольку вероятность того, что одновременно коэффициенты передачи для обеих антенн  $h_1$  и  $h_2$  окажутся близкими к нулю незначительна, помехоустойчивость приема сигналов в системе Аламоути по отношению к системе, где на БС применяется только одна антенна, существенно повышается.

На вход антенны АС в системе Аламоути (применение одной антенны значительно упрощает АС) поступает сумма сигналов, излучаемых одновременно двумя антеннами БС. Принимаемые в течение двух последовательных тактов времени сигналы подвергаются линейной обработке с учетом значений  $h_1$  и  $h_2$  между передающими и приемной антеннами. В результате, как показано в [1, 2], предложенный Аламоути алгоритм передачи сигналов с БС и их оптимальная обработка на приеме дают на АС эффект, соответствующий двукратному разнесению с оптимальным когерентным сложением сигналов  $S_1(t)$  и  $S_2(t)$ , переданных разными антеннами БС.

Отметим некоторые особенности системы Аламоути. В ней, как и во всех предложенных системах с ПВК, в АС должны применяться блоки, где осуществляются измерения  $h$  между антенной АС и всеми антеннами БС, что, естественно, усложняет АС. Кроме того, в случае, если измерения указанных  $h$  неточны, в системе Аламоути (как и в других системах с ПВК), появляются переходные помехи при разделении сигналов  $S_1(t)$  и  $S_2(t)$  что, снижает помехоустойчивость их приема. Во всех системах с ПВК при приеме переданных сигналов наблюдается их задержка, равная, по крайней мере,  $K_{BC}$  тактам.

В системе Аламоути полная кратность разнесения  $K_{BC}K_{AC}$  достигается без снижения скорости передачи сообщений ( $R$ ) по каналу связи в отличие от традиционных методов последовательной передачи сигналов. Однако, как показано в [1], для комплексных сигналов, к которым, в частности, относятся сигналы КАМ-М, в системах с ПВК при  $K_{BC} \geq 3$  достижение полной кратности разнесения  $K_{BC}K_{AC}$  без снижения  $R$  невозможно. При  $K_{BC} \geq 3$  в таких системах  $R$ , по сравнению с последовательным методом передачи сообщений, снижается в два раза. Имеется лишь несколько пространственно-временных кодов, для которых  $R$  снижается лишь в 4/3 раза [1].

В системах МІМО к каждой из антенн должен подключаться отдельный приемо-передатчик, что приводит к существенному удорожанию таких систем. В последние годы были выполнены многочисленные исследования [3-5] систем, где число применяемых приемо-передатчиков существенно меньше общего числа установленных антенн ( $N_{BC} + N_{AC} \gg 2$ ). В таких системах на передаче и приеме выполняются измерения комплексных коэффициентов передачи между всеми антеннами БС и АС. На основании этих измерений

небольшое число приемо-передатчиков на БС и АС (1 или 2) автоматически подключается к тем антеннам, для которых модули этих коэффициентов передачи имеют наибольшие значения. При этом кратность разнесения при приеме сигналов достигает максимально возможной величины равной  $K_{БС} K_{АС}$ .

В данной работе рассмотрена система передачи и приема сигналов, в которой в качестве метода передачи используется временной дуплекс (TDD – Time Division Duplex). При этом в течение одного кадра сообщения передаются в разных направлениях (на линии вниз – с БС на АС, и вверх – с АС на БС) поочередно в одном и том же частотном канале. Примером систем с TDD является известная система DECT.

В системе, исследованной в данной работе, на БС применяется  $K_{БС}$  пространственно-разнесенных антенн, а на АС может использоваться либо одна, либо две антенны. На БС и АС имеется по одному передатчику и одному приемнику. При приеме на БС специальных измерительных сигналов, переданных с АС, выполняются измерения модулей коэффициентов передачи между каждой из антенн БС и АС. Результаты этих измерений используются для автовыбора на БС и АС антенн, на которые будут поступать передаваемые и принимаемые сигналы этих станций. Из всех возможных комбинаций ( $K_{БС} K_{АС}$ ) антенн на БС и АС выбирается та, для которой модуль коэффициента передачи между антеннами имеет наибольшие значения. В такой системе, в отличие от систем с ПВК, сигналы АС и БС передаются последовательно, и задержки во времени при их демодуляции на приеме практически не возникает.

В данной статье получены формулы, позволяющие выполнить анализ помехоустойчивости исследуемой системы. Показано, что, в случае применения на АС одной антенны в системе реализуется кратность разнесения, равная  $K_{БС}$ . Если же на АС применяются две антенны, то кратность разнесения равна  $2K_{БС}$ . Кроме того, приведены результаты расчетов, позволяющие определить, насколько возможно увеличить скорость передачи в системе в результате применения в ней нескольких антенн на БС и АС.

**Анализ помехоустойчивости системы с ММО.** На рис. 1 представлена исследуемая система связи, где АС имеет одну или две антенны. На входы передатчиков БС и АС поступают последовательности двоичных информационных символов, которые разбиваются на блоки, состоящие из двух или четырех, или шести и т.д. символов. Каждый из таких блоков преобразуется, соответственно, в сигналы с КАМ-4, КАМ-16, КАМ-64 и т.д.

На БС выходы каждой из  $K_{БС}$  антенн подключены к блоку (*Близмер*), в котором осуществляются измерения амплитуды сигналов, принятых этими антеннами от АС.

Если  $K_{АС}=1$ , то для проведения таких измерений дополнительных испытательных сигналов с АС на БС передавать не требуется, так как на каждой из антенн БС эти измерения могут осуществляться путем измерения модуля коэффициента передачи между БС и антенной АС при приеме на БС информационных сигналов от АС. Если же  $K_{АС}=2$ , то при применении метода TDD в информационную последовательность передаваемых кадров следует время от времени вставлять специальные кадры, в которых будут передаваться измерительные сигналы. Для осуществления измерений можно использовать и обычно имеющиеся в составе передаваемого сообщения пилот-сигналы. Следует иметь в виду, что в рассматриваемой системе выбор для связи пары антенн БС и АС должен осуществляться на БС путем приема измерительных сигналов, передаваемых с обеих антенн АС.

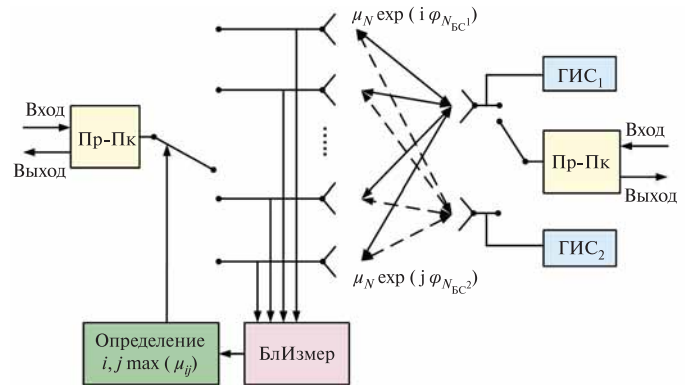


Рис. 1

На рис. 1 показан один из возможных способов передачи измерительных сигналов. Они формируются двумя генераторами испытательных сигналов (ГИС), подключенными к антеннам АС. Поскольку  $R$ , как правило, существенно превосходит скорость изменения параметров канала связи ( $R$  в современных системах связи имеет значения более сотен кбит/с, а скорость изменения параметров канала связи – не более 10...50 Гц), то на передачу испытательных сигналов необходимо расходовать только малую часть времени. При этом  $R$  из-за введения испытательных сигналов не должна снижаться более чем на 1 – 10%.

В течение времени передачи нескольких измерительных кадров, общая длительность которых составляет примерно 50–100 символов сообщения, передача информационных сигналов с БС на АС не ведется. В течение длительности одной половины измерительного кадра гармонический сигнал с АС передается с наибольшей (возможной в системе КАМ) амплитудой с одной из антенн, а в течение другой половины – с другой антенны.

На БС осуществляется только прием измерительных символов, которые обрабатываются в *Близмер*. В результате на выходе определяются значения  $\mu_{ij}$  модулей коэффициентов передачи между  $i$ -й антенной БС и  $j$ -й антенной АС ( $i=1...K_{БС}$ ,  $j=1...K_{АС}$ ).

Измерения  $\mu_{ij}$  позволяют найти ту комбинацию антенн БС и АС, для которых этот коэффициент имеет наибольшее значение. Именно эту пару антенн следует использовать для передачи и приема сообщений между БС и АС. На рис. 1 показан блок (блок определения значений  $i$  и  $j$  из условия  $\max(\mu_{ij})$ ), формирующий сигнал, управляющий коммутацией приемо-передатчика БС (блок *Пр-Пк*) на выбранную антенну. Кроме того, в случае, если на АС применяются две антенны, этот сигнал передается также на АС и управляет подключением ее *Пр-Пк* к соответствующей антенне.

Коэффициент передачи сигналов между выбранными для связи антеннами БС и АС можно записать в виде

$$\mu^2_0 = \max(\mu^2_{ij}). \tag{2}$$

При анализе помехоустойчивости приема сигналов на линии вверх и линии вниз будем считать, что в ветвях разнесенного приема имеют место независимые релеевские замирания. Для такого случая  $\mu_{ij}$  распределены по закону Релея  $p(\mu_{ij}) = \mu_{ij} \exp(-\mu_{ij}^2/2)$ . При этом распределение вероятностей  $\mu_0$  имеет вид [6]:

$$p(\mu_0) = \mu_0 \exp(-\mu_0^2/2) [1 - \exp(-\mu_0^2/2)]^{(K_{БС} K_{АС} - 1)}. \tag{3}$$

Выполним анализ помехоустойчивости приема сигналов на линии вверх и вниз для случая, когда передача сигналов

осуществляется с использованием КАМ- $M$ . В системах связи, где применяется этот вид модуляции, всегда имеются блоки синхронизации, с помощью которых осуществляется синхронный прием сигналов. Для сигналов КАМ- $M$  вероятность ошибочного приема одного бита информации определяется формулой [7]:

$$P_{er}(\mu_0^2 h^2, M) = 0,5 \left\{ 1 - \left[ 1 - 2(1 - 1/\sqrt{M}) Q \left( \sqrt{\frac{3\mu_0^2 h^2}{(M-1)}} \right) \right]^2 \right\}. \quad (4)$$

В (4)  $Q(x) = \int_x^\infty \frac{\exp(-x^2/2)}{\sqrt{2\pi}} dx$ ,  $M=2^k (k \geq 2)$ ;  $h^2$  – отношение средней мощности сигнала, принимаемого в одной ветви разнесения, к мощности шума в полосе, равной  $1/T$ , где  $T$  – длительность передачи одного символа.

Для определения средней вероятности ошибки приема сигналов, поступающих на БС от АС и в обратном направлении, следует усреднить выражение (4) по распределению  $\mu_0$  [6]. Плотность распределения вероятности этой величины задана формулой (3). В результате получим:

$$P_S(h^2, M) = \frac{1}{2} \int_0^\infty P_{er}(\mu_0^2 h^2, M) p(\mu_0) d\mu_0. \quad (5)$$

Интеграл в (5) можно выразить аналитическими формулами [6]. Однако проще определить его численно, используя, например, пакет прикладных программ «MathCAD».

**Анализ полученных результатов.** Рассмотрим важный для практики случай, когда для работы данной системы связи выделен канал с фиксированной полосой частот, равной  $2/T$ . Основные параметры системы, которые необходимо установить в процессе проектирования, – мощности передатчика БС и АС, связанные с параметром  $h^2$ , кратность разнесения и относительная скорость передачи сообщений (по отношению к системе КАМ-2, в которой используется двукратная фазовая манипуляция) в выделенной для работы системы полосе частот, которая для КАМ- $M$  равна  $R = \log_2 M$ . Эти параметры следует определять исходя из требуемого качества приема сообщений, которое задается значением  $P_S(h^2, M)$ , равным, например,  $10^{-3}$  или  $10^{-4}$ .

На рис. 2 показаны зависимости  $P_S(h^2, M)$ , построенные для разных значений  $K_{BC}K_{AC}$  и  $M=4, 16$  и  $64$  ( $R=2, 4$  и  $6$ ). Отметим, что сравнение зависимостей  $P_S(h^2, M)$  для исследуемой системы и системы Аламоути, построенных для  $K_{BC}=2, K_{AC}=1$  и  $M=4$  ( $R=2$ ), показывает, что последняя проигрывает первой 1,5 дБ. Это связано с тем, что в системе Аламоути используются два передатчика, работающие на каждую из антенн БС и имеющие в два раза меньшую мощность в сравнении с единственным передатчиком, работающим на одну из выбранных антенн на БС и АС в исследуемой системе.

Зависимости, представленные на рис. 2, позволяют оценить энергетический выигрыш, получаемый в результате применения нескольких антенн на БС и АС, по отношению к системе Аламоути с параметрами  $K_{BC}=2, K_{AC}=1$  и  $M=4$  ( $R=2$ ). Отметим, что если  $K_{BC}K_{AC}$  в исследуемой системе является числом четным, то ее можно реализовать при  $K_{AC}=1$  и тогда на БС необходимо иметь число антенн, равное кратности разнесения. Применение на АС двух антенн позволяет, сохраняя кратность разнесения, сократить необходимое число антенн на БС в два раза.

В таблице приведены значения энергетического выигрыша  $\Delta$  (в дБ) в исследуемой системе по отношению к системе Аламоути. Из данных рис. 2 и таблицы видно, что при повышении требований к качеству приема (при уменьшении  $P_S(h^2, M)$ , а также увеличении  $K_{BC}K_{AC}$  энергетический выиг-

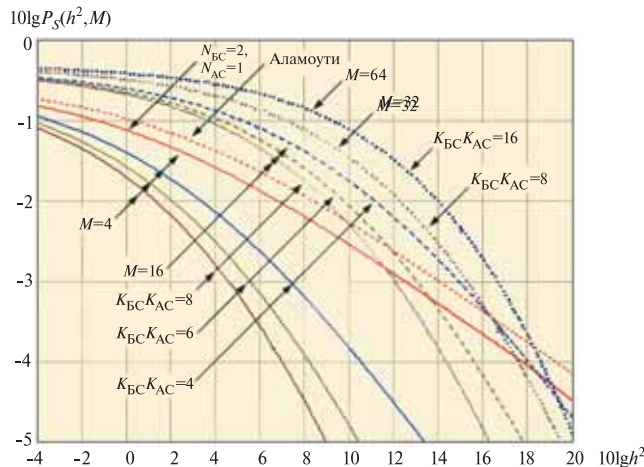


Рис. 2

рыш возрастает. Это позволяет, увеличивая  $K_{BC}K_{AC}$ , повысить скорость передачи сообщений в несколько раз.

Расчеты показывают, что в исследуемой системе, используя КАМ-16, можно, по сравнению с системой Аламоути, повысить  $R$  в два раза. При этом, применив в ней кратность разнесения, равную  $4 \times 1$  (или  $2 \times 2$ ) или же  $6 \times 1$  (или  $3 \times 2$ ), можно обеспечить качество приема, соответствующее  $P_S(h^2, M) = 10^{-3}$ . При кратности разнесения  $4 \times 1$  энергетические потери по отношению к системе Аламоути, составят 1 дБ, а при кратности разнесения  $6 \times 1$  выигрыш составит 1 дБ.

При более высоких требованиях к качеству приема сигналов (при  $P_S(h^2, M) = 10^{-4}$ ) применение КАМ-16, по отношению к системе Аламоути (как следует из таблицы), дает выигрыш от 1,3 до 5,3 дБ, если кратность разнесения изменяется, соответственно, от  $4 \times 1$  до  $8 \times 1$ .

Если при  $P_S(h^2, M) = 10^{-4}$  требуется повысить  $R$  в 2,5 раза, то, при применении КАМ-32 и кратности разнесения  $6 \times 1$ ,  $\Delta$  составит 3,7 дБ. Используя в системе кратность разнесения  $8 \times 2$  и КАМ-64, при той же вероятности ошибочного приема возможно, по сравнению с системой Аламоути, увеличить скорость передачи сообщений в три раза, а также получить  $\Delta = 0,7$  дБ.

**Выводы.** 1. В данной работе показано, что применение автовыбора наиболее благоприятной комбинации антенн на БС и АС обеспечивает высокую помехоустойчивость приема сигналов.

2. Дано сравнение характеристик исследуемой системы и системы Аламоути, в которой используются сигналы КАМ-4 и применяются две антенны на БС и одна антенна на АС. Показано, что, повышая кратность разнесения сигналов в рассматриваемой системе, можно получить достаточно высокий энергетический выигрыш по сравнению с системой Аламоути.

		$K_{BC}K_{AC}$					
		2	3	4	6	8	16
$\Delta$ , дБ при $P_S(h^2, M) = 10^{-3}$	$M=4$ ( $R=2$ )	1,5	3,5	4,5	6,5	7,5	-
	$M=16$ ( $R=4$ )	-	-	-1	1	2	-
	$M=32$ ( $R=5$ )	-	-	-	-1,2	-	0,5
	$M=64$ ( $R=6$ )	-	-	-	-	-	-2,5
$\Delta$ , дБ при $P_S(h^2, M) = 10^{-4}$	$M=4$ ( $R=2$ )	1,5	6,5	8,7	10,7	11,9	-
	$M=16$ ( $R=4$ )	-	-	1,3	3,6	5,3	-
	$M=32$ ( $R=5$ )	-	-	-	3,7	-	0
	$M=64$ ( $R=6$ )	-	-	-	-	-	0,7



3. Исследованная система позволяет при соответствующих условиях в три раза увеличить скорость передачи сигнала по сравнению с системой Аламоути.

4. Исследованная система технически проще систем с ПВК. Важное ее отличие заключается в том, что в ней на каждой стороне радиолинии применяется только один приемопередатчик и она не имеет (в том числе и на АС) сложных блоков, необходимых для преобразований последовательного потока передаваемых символов в несколько параллельных подпотоков на передаче и мультиплексирования принятых подпотоков в единый поток символов на приемном конце линии связи. В этой системе не вносится задержка при передаче и приеме сообщений. Кроме того, в ней не требуется применение в АС блоков для измерения модулей коэффициентов передачи между антеннами АС и БС.

*Автор признателен В.Б. Кренделину за полезное обсуждение результатов данной работы.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Savo G.** Glisic Advanced Wireless Communications, John Wiley&Sons, Ltd. – 2007.
2. **Крейделин В.Б.** Новые методы обработки сигналов в системах беспроводной связи. – СПб.: «Линк», 2009.
3. **Sanayei S. and Nasratinia A.** Antenna selection in MIMO systems// IEEE Comm. Magazine. – 2004. – Vol. 42. – № 10.
4. **Chen Z., Yuan A.J. and Zhou Z.** Performance of Alamouti scheme with transmit antenna selection/ Electronics Letter. – 2003. – P. 1666–1667.
5. **Liang Yang and Jiain Qin.** Performance of Alamouti Scheme with Transmit Antenna Selection for M-ary Signals// IEEE Trans. on Wireless Communications. – 2006. – Vol. 5. – № 12.
6. **Финк Л.М.** Теория передачи дискретных сообщений. – М.: Советское радио. – 1970.
7. **Прокис Дж.** Цифровая связь. Пер. с англ. под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000.

*Получено 16.11.10*

## К 70-ЛЕТИЮ АЛЕКСАНДРА ЕВГЕНЬЕВИЧА КРУПНОВА

**26 июня отметил свой юбилей президент Союза участников рынка инфокоммуникационных услуг (Инфокоммуникационный Союз) Александр Евгеньевич Крупнов.**



А.Е. Крупнов родился 26 июня 1941 г. в Москве. В 1960–1963 гг. проходил службу в Вооруженных силах СССР. В 1968 г. окончил Московский электротехнический институт связи по специальности «инженер электросвязи».

После окончания института работал инженером, ведущим инженером, начальником телефонного узла Московской городской телефонной сети (МГТС). С 1978 по 1991 г. занимал ряд руководящих должностей в аппарате Министерства связи СССР. С 1991 г. возглавлял научно-технический отдел, отдел электросвязи и отдел международного сотрудничества Министерства связи Российской Федерации. В январе 1995 г. назначен первым заместителем министра связи РФ: обеспечивал разработку и проведение рыночных реформ в области связи, развитие и внедрение в России мобильных систем связи. Возглавлял Лицензионную комиссию Минсвязи, как представитель государства входил в состав совета директоров ОАО «Ростелеком».

В марте 1997 г., после реорганизации Министерства связи РФ в Госко-

митет РФ по связи и информатизации, А.Е. Крупнов назначается его председателем, а также председателем государственных комиссий по радиочастотам, электросвязи и информатизации при Госкомсвязи РФ. В ноябре 1997 г. вошел в состав коллегии представителей государства в ЗАО «Общественное российское телевидение» (ОРТВ), а также в состав правительственной комиссии по геоинформационным системам. С августа 1998 г. – заместитель руководителя коллегии представителей государства в ОАО «Связьинвест», с ноября 1998 г. – ее председатель.

В 1999 г. А.Е. Крупнов назначается первым заместителем генерального директора ОАО «Межрегиональный ТранзитТелеком», избирается председателем совета директоров МТТ. С 1999 г. он – президент Ассоциации операторов сетей связи третьего поколения (сегодня – Союз участников рынка инфокоммуникационных услуг). В апреле 2007 г. назначается

председателем конкурсной комиссии по выдаче лицензий 3G в России.

А.Е. Крупнов – действительный член Международной академии информатизации, Международной академии связи, Международной академии технологических наук, Международной академии информатизации, информационных процессов и технологий, Международной академии качества телекоммуникаций, Всемирной академии наук по комплексной безопасности.

Александр Евгеньевич Крупнов – кандидат технических наук, автор более 60 публикаций в отраслевых изданиях. Неоднократно выступал в «Электросвязи» как автор статей по актуальным проблемам развития телекоммуникаций.

А.Е. Крупнов – председатель Общественного совета при Федеральном агентстве связи, заслуженный работник связи РФ, Мастер связи, Почетный радист, лауреат премии Правительства РФ, международного конкурса «Элита информациологов мира». Награжден орденом «Знак Почета», медалями и ведомственными наградами.

**Редколлегия и редакция нашего журнала сердечно поздравляют Александра Евгеньевича с юбилеем и желают ему здоровья и успехов на поприще служения отрасли инфокоммуникаций и связи.**