

УДК 621.396.96

АНАЛИЗ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ ММО РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

К. т. н. С. А. Горшков, П. И. Оргиш

Военная академия Республики Беларусь

Республика Беларусь, г. Минск

sedbox@mail.ru, orgish.1986@mail.ru

Работа посвящена сравнительному анализу отношения сигнал/шум радиолокационных систем с обычной активной фазированной антенной решеткой (в дальнейшем РЛС с АФАР) и ММО РЛС с неразнесенными антеннами и кодированными сигналами.

Ключевые слова: ММО радиолокационная система, активная фазированная решетка.

В последние годы как в зарубежной, так и отечественной литературе активно обсуждается такое направление в радиолокации как ММО (Multiple Input — Multiple Output — «много входов — много выходов») РЛС [1—5]. В самом общем смысле под ММО радиолокационной системой (рис. 1) понимается совокупность K передающих элементов (позиций), излучающих K сигналов $u_i(t, \theta)$, $i = \overline{1, K}$, и L приемных элементов (позиций), обеспечивающих одновременный прием и обработку аддитивной суммы этих сигналов $m(t, \theta) = \sum_i u_i(t, \theta)$ [4]. В качестве системы сигналов чаще всего используются взаимно ортогональные сигналы.

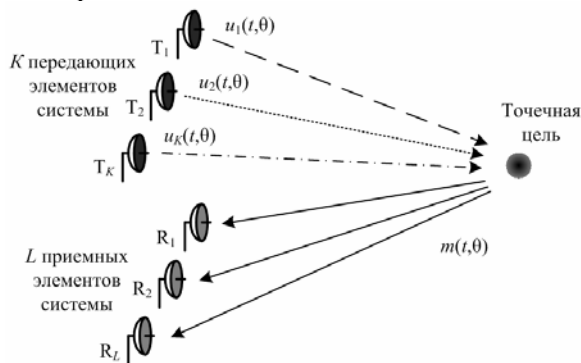


Рис. 1. Общий принцип работы ММО РЛС

По общему определению, многие из классических радиолокационных систем можно рассматривать как ММО РЛС. К примеру, РЛС с синтезом апертуры можно рассматривать как ММО РЛС с разнесенными (взаимно ортогональными) по времени сигналами.

В настоящий момент ММО РЛС можно разделить, как предложено в [1], на два основных класса. Первый класс содержит ММО РЛС с неразнесенными антеннами и кодированными сигналами. Второй класс включает РЛС с разнесенными антеннами, так называемые статистические ММО РЛС.

ММО РЛС с разнесенными антеннами представляют собой не что иное, как частный случай хорошо известных многопозиционных радиолокационных систем (МПРЛС) [6]. О том, что идея Statistical MIMO Radars отнюдь не нова, оговаривалось в [1].

ММО РЛС с неразнесенными антеннами и кодированными сигналами были предложены как альтернатива обычным обзорным РЛС с узкими передающими лучами антенн и последовательным во времени сканированием пространства.

В работах, посвященных ММО РЛС с неразнесенными антеннами, описывается ряд преимуществ таких систем, в сравнении с РЛС с обычными фазированными решетками, например [1, 2, 4]: улучшение характеристик обнаружения; улучшение точности оценки углового положения целей;

возможность обнаружения целей с минимальными скоростями; улучшение возможности идентификации параметров целей (parameter identifiability); лучшие возможности к адаптации.

Однако есть авторы, которые не согласны с «преимуществами» ММО РЛС [5]. Главным образом, большинство преимуществ таких РЛС перечеркивается одним из основных недостатков — потерями в отношении сигнал/шум (ОСШ).

Данная работа посвящена сравнительному анализу отношения сигнал/шум РЛС с активной фазированной антенной решеткой и ММО РЛС с неразнесенными антеннами и кодированными сигналами.

Отношение сигнал/шум

В работах, посвященных ММО РЛС, анализу такой важнейшей характеристики, как ОСШ, уделяется крайне мало внимания. Проверим, насколько ухудшается ОСШ в ММО РЛС по сравнению с РЛС с АФАР. Сравнение будем проводить для вариантов структур РЛС с АФАР и ММО РЛС, представленных на рис. 2, а, б соответственно.

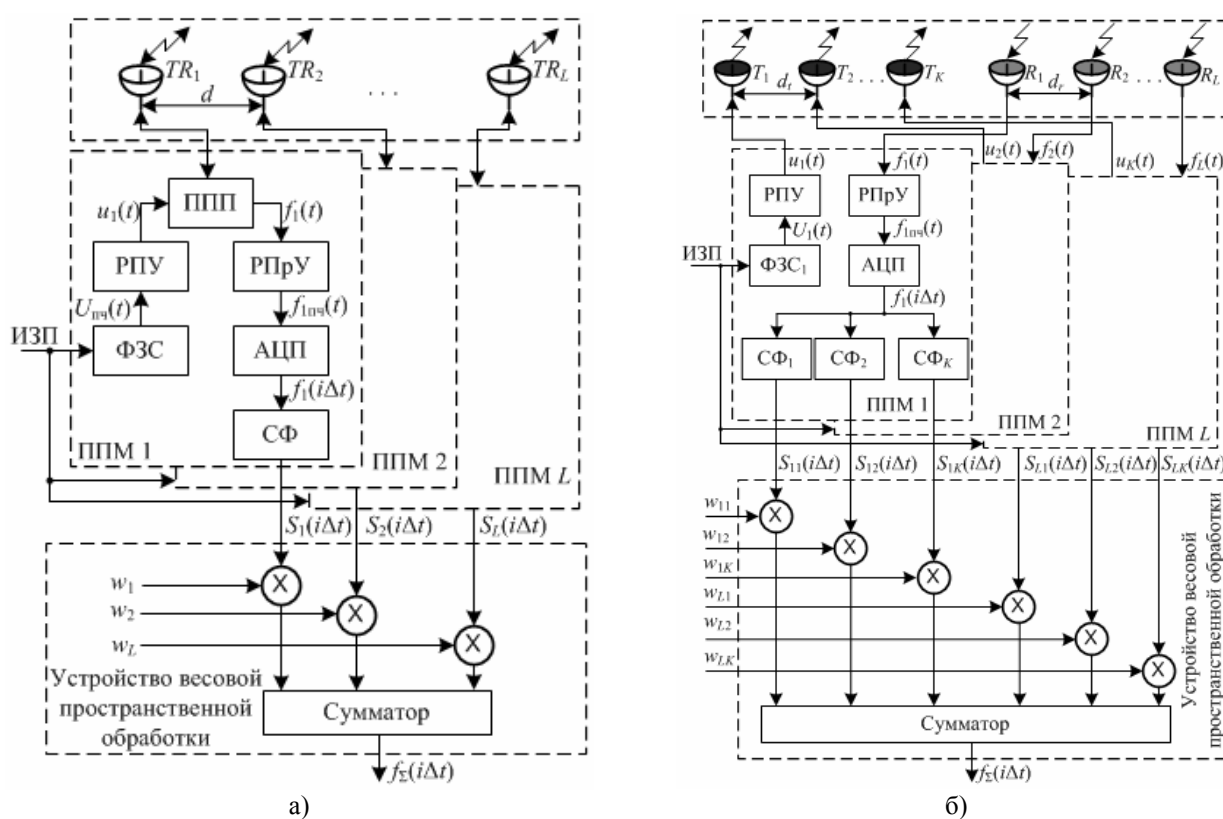


Рис. 2. Структуры РЛС с АФАР (а) и ММО РЛС (б)

При этом для упрощения антенные системы обоих РЛС будем рассматривать в виде линейных антенных решеток (АР), с K передающими и L приемными элементами, а также не будем затрагивать междупериодную обработку (МПО).

Значения ОСШ будем рассматривать на выходах устройств весовой пространственной обработки (рис. 2) [7]:

$$\gamma = \sigma_c^2 T_0 / N_{0\Sigma}, \quad (1)$$

где σ_c^2 — мощность отраженного сигнала; $N_{0\Sigma}$ — спектральная плотность мощности (СПМ) внутренних шумов на выходе устройства пространственной обработки; T_0 — длительность импульса.

Мощность отраженного сигнала (ОС) для РЛС с L -элементной АФАР можно записать в виде [7]

$$\sigma_{ca}^2 = \frac{L^2 P_0 G_{РПУ} G_{РПру} \lambda^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 r_{\text{ц}}^4}, \quad (2)$$

где P_0 — импульсная мощность передатчика одного ППМ; $L^2 P_0$ — суммарная импульсная мощность передатчика, полученная когерентным сложением сигналов с L передающих элементов (при когерентном сложении амплитуда импульса увеличивается в L раз, а мощность — в L^2); $G_{РПУ}$ ($G_{РПрУ}$) — КНД на передачу (прием); $\sigma_{ц}$ — эффективная отражающая поверхность цели; $r_{ц}$ — дальность до цели.

Пусть СПМ внутреннего шума приемного устройства каждого из ППМ одинаковы и равны N_0 . На сумматоре принятые сигналы с каждого канала когерентно суммируются, соответственно будут суммироваться и внутренние шумы:

$$N_{0\Sigma_a} = LN_0. \quad (3)$$

Подставив (2) и (3) в (1), определим ОСШ для РЛС с АФАР:

$$\gamma_{АФАР} = \frac{LP_0 T_0 G_{РПУ} G_{РПрУ} \lambda^2 \sigma_{ц}}{(4\pi)^3 r_{ц}^4 \cdot N_0}. \quad (4)$$

Теперь определим ОСШ для МИМО РЛС. Для большей наглядности, структурную схему устройства пространственной обработки МИМО РЛС (см. рис. 2, б) представим в эквивалентном виде (рис. 3).

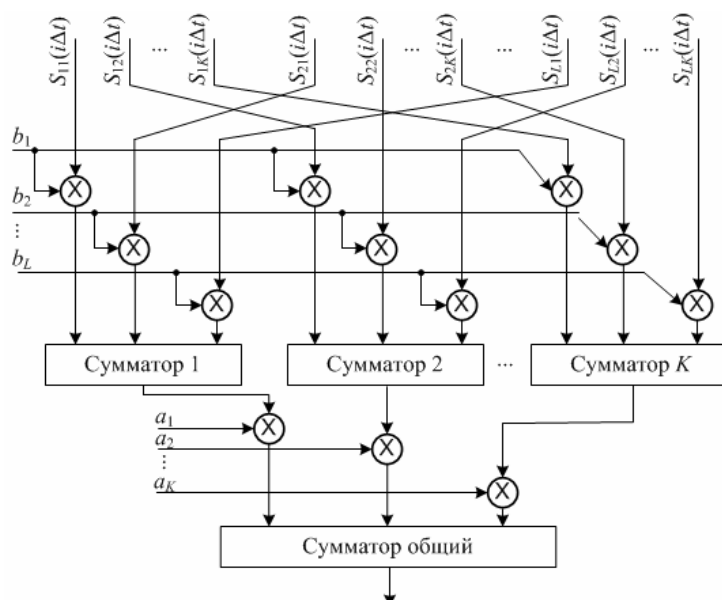


Рис. 3. Эквивалентная структура устройства пространственной обработки сигналов в МИМО РЛС

По аналогии с (2), запишем мощность отраженного сигнала от m -го передающего элемента на выходе устройства пространственной обработки K m -х согласованных фильтров (выход m -го сумматора):

$$\sigma_{cm1}^2 = \frac{P_0 G_{и} G_{РПрУ} \lambda^2 \sigma_{ц}}{(4\pi)^3 r_{ц}^4}, \quad (5)$$

где P_0 — импульсная мощность одного передатчика; $G_{и}$ — КНД одного излучателя АР.

При таком представлении мы имеем структуру, аналогичную РЛС с АФАР (см. рис. 2, а), но с одним передающим элементом. В МИМО РЛС внутренние шумы с РПрУ поступают на K согласованных фильтров (СФ) (см. рис. 2, б). В СФ внутренний шум перемножается с импульсной характеристикой (ИХ) фильтра. При перемножении случайной функции на неслучайную функцию, их корреляционные функции перемножаются. Так как ИХ фильтров взаимно ортогональны, то и внутренние шумы на выходе СФ не будут коррелированы. Соответственно, СПМ внутренних шумов будет аналогичен (3). Определим ОСШ для МИМО РЛС на выходе m -го сумматора:

$$\gamma_{МИМО1} = \frac{P_0 T_0 G_{и} G_{РПрУ} \lambda^2 \sigma_{ц}}{(4\pi)^3 r_{ц}^4 \cdot LN_0}. \quad (6)$$

На общем сумматоре (см. рис. 3) осуществляется пространственное когерентное накопление сигналов с K сумматоров, соответственно отношение сигнал/шум увеличится в K раз:

$$\gamma_{\text{MIMO}} = K\gamma_{\text{MIMO1}} = \frac{KP_0T_0G_{\text{и}}G_{\text{РПРУ}}\lambda^2\sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3r_{\text{ц}}^4LN_0}. \quad (7)$$

С учетом того, что $K = L$, определим ОСШ РЛС с обычной АФАР и МИМО РЛС:

$$\frac{\gamma_{\text{АФАР}}}{\gamma_{\text{МИМО}}} = \frac{KG_{\text{РПРУ}}}{G_{\text{и}}}. \quad (8)$$

Из (8) видно, что ОСШ в МИМО РЛС ухудшается по двум причинам: ненаправленного излучения на передачу и суммирования внутренних шумов с большего (в K раз) числа приемных каналов. При этом, если принять $G_{\text{РПРУ}}/G_{\text{и}} \approx K$, можно сказать, что ОСШ в МИМО РЛС в K^2 раз хуже, чем в РЛС с обычной АФАР (при этом еще не учитывались дополнительные потери, возникающие при суммировании на выходах СФ боковых остатков автокорреляционной функции с остатками взаимокорреляционной функции других сигналов). Ухудшение ОСШ обсуждалось в некоторых работах [1, 2, 5]. Для частичной компенсации данного эффекта в [1] и [2] предлагалось увеличивать время наблюдения, что возможно лишь для малого числа передающих элементов.

Заключение

Главный недостаток МИМО РЛС — ухудшение отношения сигнал/шум на выходе устройства пространственно-временной обработки, что обусловлено ненаправленным излучением на передачу и суммированием внутренних шумов с большего (в K раз) числа приемных каналов. Данный недостаток ограничивает область применения МИМО РЛС. Компенсация этого недостатка за счет увеличения времени наблюдения не всегда может быть реализована. Очевидно, что полная или частичная компенсация потерь ОСШ за счет когерентного и некогерентного накопления допустима лишь при небольшом количестве элементов антенной решетки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Черняк В. С. О новом направлении в радиолокации: МИМО РЛС. // Прикладная радиоэлектроника. 2009.— № 7.— С. 34—46.
2. Черняк В. С. Многопозиционные радиолокационные системы на основе МИМО РЛС // Успехи современной радиоэлектроники.— 2012.— № 8.— С. 29—45.
3. Li J., Stoica P., Xie Y. On probing signal design for MIMO radar // IEEE Trans. on Signal Processing. 2007.— Vol. 55, N 8. P. 4151—4161.
4. Li J., Stoica P. MIMO radar signal processing.— New Jersey: A John Wiley & sons inc., 2009.
5. Daum F., Huang J. MIMO Radar: Snake Oil or Good Idea // IEEE A&E Systems Magazine, May 2009.
6. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация.— Москва: Радио и связь, 1993.— 416 с.
7. Охрименко А. Е. Теоретические основы радиолокации и РЭБ. Часть I.— Москва: Воениздат, 1983.

S. A. Gorshkov, P. I. Orgish

The analysis of signal-to-noise ratio of MIMO radar-tracking systems.

The work is devoted to a comparative analysis of the signal-to-noise ratio of radar systems with a conventional active phased array and the MIMO radar with non-staggered antennas and coded signals.

Keywords: *MIMO radar system, active phased array.*