

УДК 621.396.96

Анализ влияния конфигурации приемо-передающих позиций распределенной антенной системы со слабонаправленными антеннами на потенциальную точность измерения параметров цели

Лоскутов В. Ю.^{1,*}, Чапурский В. В.¹,

Крючков И. В.¹, Нефедов С. И.¹,

Нониашвили М. И.¹

* veraes85@yandex.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Приводятся результаты анализа влияния взаимного расположения приемо-передающих позиций многопозиционного пространственно-когерентного радиолокационного комплекса со слабонаправленными антенными системами на точность оценки положения цели. Приводится методика оценки точности положения цели для пространственно-когерентного радиолокационного комплекса.

Ключевые слова: радиолокационная система, потенциальная точность измерения, распределенная антенная система, конфигурация позиций

Введение

Все большее распространение получают многопозиционные и ММО системы, использующие приемные, передающие и приемо-передающие модули с всенаправленными и слабонаправленными антеннами [1-7]. ММО системы отличаются от классических МПРЛС методом обработки сигнала, в них обрабатывается вся совокупность излученных сигналов на каждой приёмной позиции с последующим объединением результатов измерения, в отличие от МПРЛС где широкое распространение получили мультilaterационные алгоритмы. С учетом особенностей обработки для ММО систем наиболее удобно работать в области, где невозможно измерение вектора скорости за одно время накопления.

В данной статье предлагается уточнение границы области работы ММО систем с учетом требований алгоритма обработки сигнала. Предлагается рассматривать отдельно пространственно-когерентные системы, работающие в дальней зоне, соответствующей

границе Фраунгофера для антенны с раскрывом, соответствующим базе системы и пространственно-когерентные системы, где допустим переход от векторного представления скорости к радиальной скорости, направленной к центру системы. Для анализа конфигурации приемо-передатчиков предлагается использование методов оценки потенциальной точности через неравенство Краммера-Рао.

1. Основная часть

Рассмотрим условие, определяющее допустимость перехода от векторного представления скорости при обработке сигнала к представлению скорости в виде радиальной. При формировании условия будем отталкиваться от следующих положений:

- граница дальней зоны системы не должна быть менее границы зоны Фраунгофера для антенн, используемых на приемных и передающих позициях в распределенной системе;

- граница дальней зоны по дальности определяется как граница области, в которой используемое разрешение по частоте Доплера не позволяет разрешить сигнал от передатчика на любом из двух максимально разнесенных в пространстве приемников.

Граница зоны Фраунгофера (дальней зоны для антенной системы) определяется как [8]:

$$R_{ДЗ} \geq 2 \cdot \frac{D_{эф}^2}{\lambda}, \quad (1)$$

где $R_{ДЗ}$ - граница дальней зоны по дальности;

$D_{эф}$ - эффективный размер антенной системы;

λ - длина волны сигнала, излучаемого через рассматриваемую антенную систему.

Рассмотрим разность хода для двух передающих позиций и одной приемной для распределенной системы. На рис. 1 обозначены: R_n, R_{n+1} , - пара приемных позиций, разнесенных на базу системы, C - точка, соответствующая положению цели, R_k - точка соответствующая положению передатчика, α - угол между векторами $\overrightarrow{R_n C}$ и $\overrightarrow{R_{n+1} C}$, O - центр распределенной системы.

В представленных обозначениях влияние вектора движения цели осуществляется по трем векторам: $\overrightarrow{R_n C}$, $\overrightarrow{R_{n+1} C}$, $\overrightarrow{CR_k}$. Для выполнения условия неразличимости частотных компонент между соответствующими векторами достаточно оценить максимальное значение разницы вносимого частотного искажения, между векторами между которыми наибольший угол. Расстояние между R_n и R_{n+1} равно базе системы, соответственно необходимо получить зависимость границы дальней зоны от разрешающей способности системы по частоте.

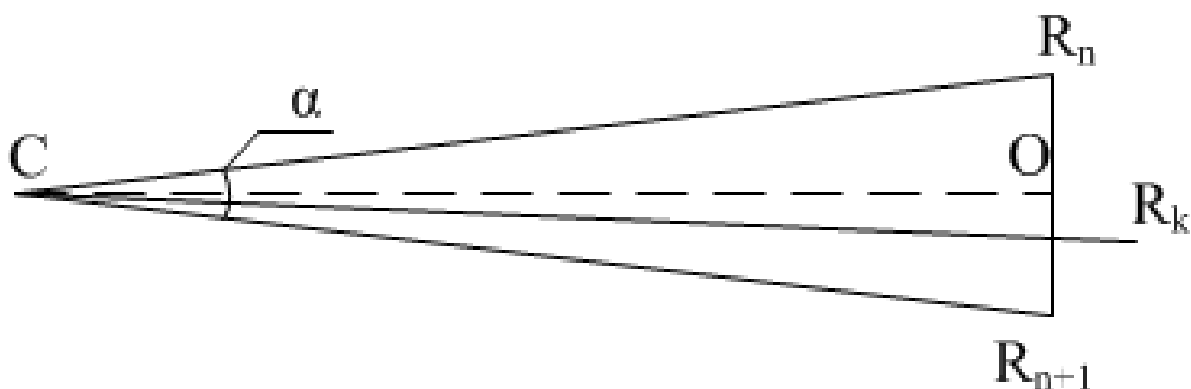


Рис. 1. Разность хода сигнала для двух приемных и одной передающей позиции

Опишем частотное искажение вносимое движением цели в случае, если цель летит в сторону приемников R_n, R_{n+1} :

$$Fd_n = 2 \cdot \frac{|\vec{V}_y|}{\lambda} \quad (2)$$

$$Fd_{n+1} = 2 \cdot \frac{|\vec{V}_y| \cdot \cos(\alpha)}{\lambda}$$

где V_p - длина волны несущей частоты передатчика R_k .

Выразим угол α через дальность до цели и базу многопозиционной системы:

$$\alpha = 2 \cdot \arctg\left(\frac{2 \cdot R_y}{B}\right), \quad (3)$$

где R_y - дальность до цели;

B - база системы.

Оценим разницу между вносимыми частотными искажениями, на основе формулы (3) и приравняем к разрешению по частоте:

$$\frac{1}{\tau_{\text{эф}}} = 2 \cdot \frac{|\vec{V}_y|}{\lambda} \cdot (1 - \cos(\alpha)), \quad (4)$$

где $\tau_{\text{эф}}$ - эффективное время накопления сигнала.

Подставим (3) и выделим отношение дальности к базе системы, получим:

$$\frac{R_y}{B} \geq \sqrt{\frac{\lambda}{16 \cdot \tau_{\text{эф}} \cdot V_p - \lambda}}. \quad (5)$$

где V_p - радиальная скорости цели в направлении на центр распределенной системы.

На рис. 2 приведены зависимости минимальной дальности для работы системы от максимальной скорости цели, при длине волны 2 м и базе 1000 метров.

Запишем минимальную дальность для многопозиционной системы как:

$$R_{дз} = \max \left(2 \cdot \frac{D_{эл}^2}{\lambda}, B \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{16 \cdot \tau_{эф} \cdot V_p - \lambda}} \right) \quad (6)$$

где $R_{дз}$ - дальность, свыше которой допустимо при расчете использовать радиальную скорость вместо вектора полной скорости цели; $D_{эл}$ - наибольший используемый в многопозиционной системе эффективный размер антенной системы передающего элемента; λ - длина волны сигнала, излучаемого через рассматриваемую антенную систему; B - база многопозиционной системы; $\tau_{эф}$ - эффективное время накопления; V_p - радиальная скорость цели; $\max(x, y)$ - наибольшее значение из x и y .

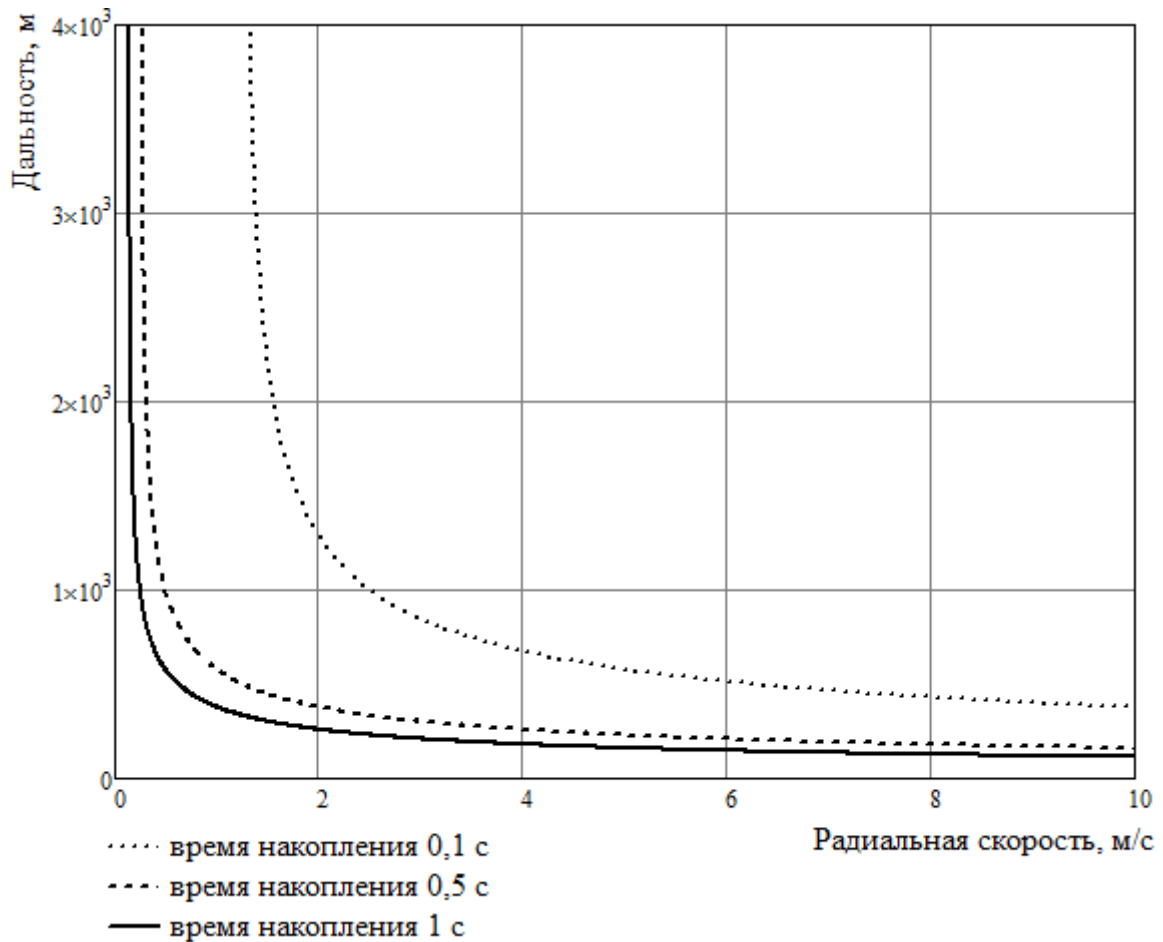


Рис. 2. Зависимость минимальной дальности от модуля радиальной скорости

Наиболее распространённым методом анализа МПРЛС и подобных им систем является сравнение потенциальной точности измерения положения цели, обусловленное структурой системы [3-7]. Воспользуемся этим методом для оценки влияния конфигурации позиций ММО системы на потенциальную точность измерения.

Анализ потенциальной точности можно провести, используя неравенство Крамера-Рао, позволяющее не учитывать алгоритм обработки принятых сигналов.

Опишем вектор состояния цели \mathbf{a} , для оценки потенциальной точности из всех параметров, входящих в вектор состояния представляют интерес только координаты

положения. Так как проводится анализ измерительной системы, то полагаются известными не составляющие вектора $\mathbf{a} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)^T$, а измеряемые величины $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)^T$, связанные с \mathbf{a} известными функциями: $\xi_i = h_i(\mathbf{a})$, $i=1, n$. Тогда потенциальная (максимально достижимая) точность оценки составляющих вектора \mathbf{a} определяется выражением, полученным из неравенства Крамера-Рао [3]

$$\mathbf{V}_\alpha = (\mathbf{H}^T \mathbf{V}_\xi^{-1} \mathbf{H})^{-1} \quad (7)$$

где \mathbf{V}_α – ковариационная матрица оценок $\hat{\mathbf{a}}$; \mathbf{V}_ξ – ковариационная матрица ошибок измерений ξ ; $\mathbf{H} = \|\partial h_i(\mathbf{a}) / \partial \alpha_j\|$ – матрица производных функций $h_i(\mathbf{a})$, $i=1, n$, по всем составляющим α_j , $j=1, m$ вектора \mathbf{a} .

На главной диагонали матрицы \mathbf{V}_α располагаются дисперсии оценок соответствующих составляющих вектора \mathbf{a} .

Выразим расстояние зависимость дальности от координат позиции системы до цели, при этом система синхронизирована, и каждая позиция может измерить непосредственную дальность до цели, в таком случае получим:

$$D_i(x, y, z) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (8)$$

Для того чтобы пользоваться формулой (7) сформируем матрицу \mathbf{H} , для n приемных позиций она будет иметь вид:

$$\mathbf{H} = \begin{vmatrix} \frac{\partial D_1(x, y, z)}{\partial x} & \frac{\partial D_1(x, y, z)}{\partial y} & \frac{\partial D_1(x, y, z)}{\partial z} \\ \frac{\partial D_2(x, y, z)}{\partial x} & \frac{\partial D_2(x, y, z)}{\partial y} & \frac{\partial D_2(x, y, z)}{\partial z} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial D_n(x, y, z)}{\partial x} & \frac{\partial D_n(x, y, z)}{\partial y} & \frac{\partial D_n(x, y, z)}{\partial z} \end{vmatrix} \quad (9)$$

Для получения матрицы \mathbf{H} , требуются производные R_i по параметрам x, y, z которые имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial D_i(x, y, z)}{\partial x} &= \frac{x - x_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \\ \frac{\partial D_i(x, y, z)}{\partial y} &= \frac{y - y_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \\ \frac{\partial D_i(x, y, z)}{\partial z} &= \frac{z - z_i}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \end{aligned} \quad (10)$$

Будем полагать, что измерения проводятся на позициях независимо, тогда ковариационную матрицу ошибок измерения можно записать как:

$$\mathbf{V}_\xi = \begin{vmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_n^2 \end{vmatrix} \quad (11)$$

где σ_i^2 - дисперсия измерений на i -ой позиции, $i=1,2,3 \dots n$.

Так как приемо-передающие позиции полагаются одинаковыми, будем при расчете считать дисперсию измерения на всех позициях одинаковой по уровню. Результатом расчета по формуле (7) будет квадратная матрица, размерностью соответствующая числу независимых составляющих вектора состояния, зависящих от измеряемых параметров. В рассматриваемом случае на главной диагонали матрицы \mathbf{V}_a будут находиться дисперсии оценок x, y, z соответственно.

Необходимо проанализировать, какой подход к построению ММО систем применим в большей степени: построение системы как неэквидистантной разряженной антенной решетки либо построение системы как МПРЛС. Для анализа рассмотрим потенциальную точность четырех конфигураций антенн при единой базе 3000 м, и десяти приемо-передающих позиций, вид конфигураций показан на рис. 3.

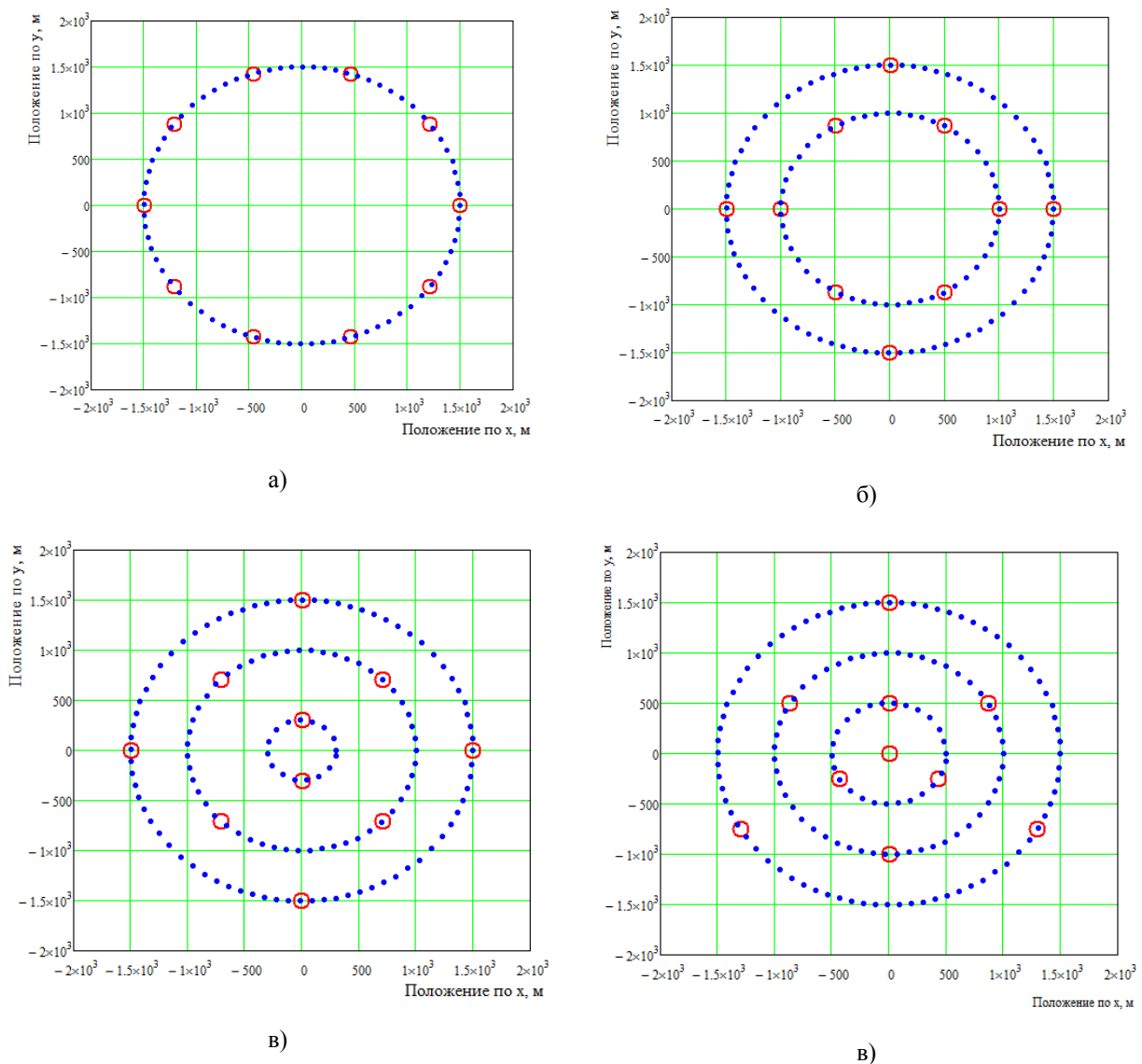


Рис. 3. Расположение приемо-передающих позиций в пространстве

На рис. 4 показаны зависимость среднего квадратического отклонения по x , y в сечении плоскостью ZOX , при этом высота при расчете составляла 20 км, а на рис. 5 – зависимость СКО по z .

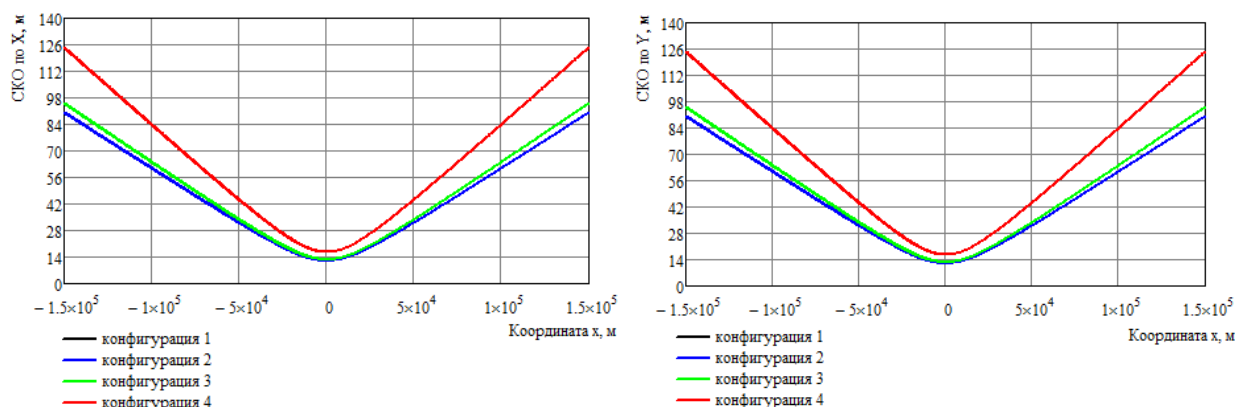


Рис. 4 Зависимость СКО по x и y

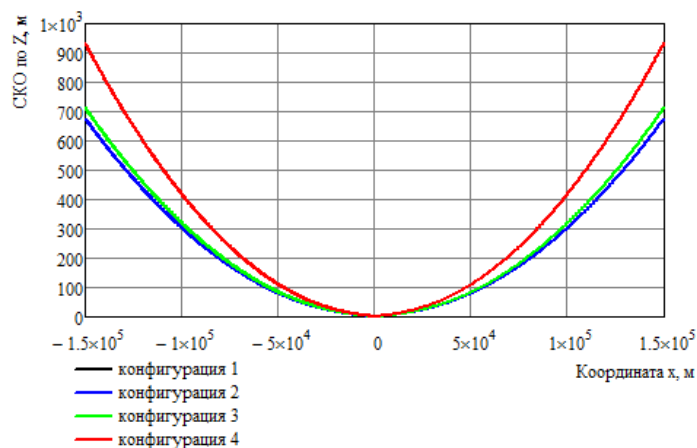


Рис. 5. Зависимость СКО по z

На рис. 6 показана зависимость СКО измерения по x в зависимости от положения на плоскости XOY для первой конфигурации позиций.

Из анализа рисунков можно сделать вывод, что изменение СКО измерения в зависимости от положения цели носит у ММО РЛС и антенной системы в дальней зоне схожий характер. Рис. 4 и рис. 5 показывают, что конфигурации с позициями, не обеспечивающими максимальное расстояние от центра системы, обладают большими значениями СКО по координатам. Таким образом, в отличие от разряженных антенных решеток и распределенных антенных систем [9-10], наибольшее влияние на потенциальную точность ММО РЛС оказывают позиции, расположенные на наибольшем удалении от центра системы.

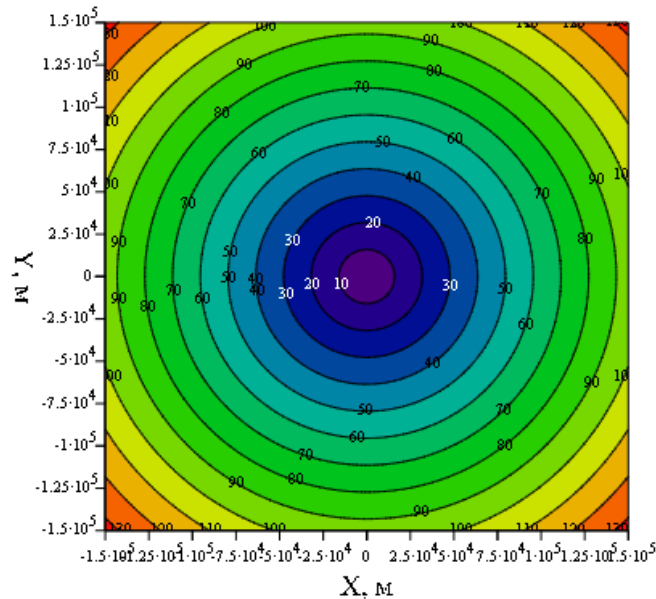


Рис. 6. Зависимость СКО измерения по x

Заключение

На основе анализа приведенных зависимостей можно сделать следующие выводы:

- ММО РЛС с слабонаправленными антеннами можно анализировать с точки зрения оценки потенциальной точности измерения положения цели;
- наибольшее влияние на точность измерения координат ММО РЛС оказывают позиции расположенные на максимальном отдалении от центра системы;
- формируемые элементы разрешения для ММО РЛС носят схожий характер по сравнению с МПРЛС на малом расстоянии от центра системы (порядка нескольких баз);
- элементы разрешения для ММО РЛС с увеличением расстояния до них стремятся к увеличению их размера по дальности и на определенных дальностях можно считать, что формируются микролучи, схожие по структуре с микролучами радиолокационного интерферометра [10].

На основе проведенного анализа ММО РЛС занимают промежуточную позицию при переходе от классических МПРЛС к радиолокационным интерферометрам. Следует отметить, что в ММО РЛС элемента разрешения имеет структуру свойственную МПРЛС при небольшой дальности до цели, с ростом дальности до цели форма элемента разрешения стремится к эквивалентному пространственному лучу [9].

Статья выпущена в рамках НИОКТР "Реализация комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства радиолокационного комплекса для системы управления воздушным движением с удаленной диспетчеризацией", выполняемой МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с ОАО "РТИ" в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, в целях реализации постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах

государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства», при финансовой поддержке по проекту Министерства образования и науки Российской Федерации.

Список литературы

1. Chapursky V.V., Ivashov S.I., Vasiliev I.A., Zhuravlev A.V. Short Range Radar with mimo Antenna System and Multifrequency Sounding Signal // Int. Conf. "Progress In Electromagnetics Research Symposium" (PIERS-2009), Moscow, Russia, August 18–21, 2009. P. 716-720.
2. Rabideau D.J, Parker P.A. Ubiquitous MIMO Multifunction Digital Array Radar and the Role of Time-Energy Management in Radar. Project Report DAR-4. Lincoln Laboratory Massachusetts Institute of Technology, 2004.
3. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
4. Чапурский В.В. Избранные задачи теории сверхширокополосных радиолокационных систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 279 с.
5. Chernyak V. On the Concept of MIMO Radar // Proc. of 2010 IEEE Radar Conference. Washington. CD. USA. IEEE Publ., 2010. P. 327-332. DOI: [10.1109/RADAR.2010.5494601](https://doi.org/10.1109/RADAR.2010.5494601)
6. Черняк В.С. О новых и старых идеях в радиолокации: МИМО РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 2. С. 5-20.
7. Черняк В.С. Многопозиционные радиолокационные системы на основе МИМО РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 8. С. 29-47.
8. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / под. ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
9. Нониашвили М.И., Крючков И.В., Нефедов С.И. Анализ интерференционной структуры элемента разрешения в многопозиционных обзорных пространственно-когерентных радиолокационных комплексах с остронаправленными антеннами // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 11. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/248808.html> (дата обращения 01.05.2015).
10. Слукин Г.П., Чапурский В.В. Пространственно многоканальные РЛС большой дальности с высокой разрешающей способностью // Радиотехника. 2013. № 11. С. 24-34.

Influence of Transceiver Positions Configuration of MIMO Radar System with Wide Beam Antennas on Potential Measurement Accuracy

V.Yu. Loskutov^{1,*}, V.V. Chapurskiy¹,

I.V. Kryuchkov¹, S.I. Nefedov¹,

M.I. Noniashvili¹

* veraes85@yandex.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: radar system, the potential measurement accuracy, distributed antenna system, positions configuration

The article proposal is to clarify the operating area of MIMO radar systems taking into consideration the requirements for the algorithms of signal processing. It offers to consider separately the spatially coherent systems operating in the far field that corresponds to the appropriate Fraunhofer's boundary for antenna with the aperture corresponding to the system base and the spatially coherent systems where a transition is acceptable from the vector representation of the speed to the radial speed directed toward the center of the system. To analyze the influence of transceivers configuration on the system potential accuracy the paper offers to use a Krammer-Rao inequality- based method.

A justification and refinement of concept of the far field for a distributed antenna system are given. Under far field for a distributed antenna system the authors propose to consider such a field with such a range where Doppler frequency resolution doesn't allow resolving the signal from one transmitter in any of two maximally spaced receivers.

The article presents potential accuracy estimates of distributed antenna system, which allow us to draw the following conclusions:

- MIMO radar with omnidirectional antennas can be analyzed using a proposed method based on Krammer-Rao inequality;
- the maximum distant positions from the center of the system have the greatest influence on the potential measuring accuracy of the MIMO radar coordinates;
- generated resolution elements for MIMO radar are similar to multiposition radar system in the area where distance from the center of the system does not exceed several system bases;

- resolution elements for MIMO radar with increasing distance from system center tend to increase their range size and at certain ranges can be regarded as narrow (micro) beams formed to be similar in structure to the narrow beams of radar interferometer.

Reference

1. Chapursky V.V., Ivashov S.I., Vasiliev I.A., Zhuravlev A.V. Short Range Radar with mimo Antenna System and Multifrequency Sounding Signal. *Int. Conf. "Progress In Electromagnetics Research Symposium" (PIERS-2009)*, Moscow, Russia, August 18–21, 2009, pp. 716-720.
2. Rabideau D.J, Parker P.A. *Ubiquitous MIMO Multifunction Digital Array Radar and the Role of Time-Energy Management in Radar. Project Report DAR-4*. Lincoln Laboratory Massachusetts Institute of Technology, 2004.
3. Chernyak V.S. *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya* [Multiposition radar]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993. 416 p. (in Russian).
4. Chapurskii V.V. *Izbrannye zadachi teorii sverkhshirokopolosnykh radiolokatsionnykh sistem* [Selected problems of the theory of ultra-wideband radar systems]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 279 p. (in Russian).
5. Chernyak V. On the Concept of MIMO Radar. *Proc. of 2010 IEEE Radar Conference*. Washington. CD. USA. IEEE Publ., 2010, pp. 327-332. DOI: [10.1109/RADAR.2010.5494601](https://doi.org/10.1109/RADAR.2010.5494601)
6. Chernyak V.S. About New and Old Ideas in Radar: MIMO Radars. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of Modern Radioelectronics*, 2011, no. 2, pp. 5-20. (in Russian).
7. Chernyak V.S. Multisite radar systems based on MIMO radars. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki = Achievements of Modern Radioelectronics*, 2012, no. 8, pp. 29-47. (in Russian).
8. Shirman Ya.D., ed. *Radioelektronnye sistemy: osnovy postroeniya i teoriya. Spravochnik* [Radioelectronic systems: fundamentals and theory. Handbook]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007. 512 p. (in Russian).
9. Noniashvili M.I., Kryuchkov I.V., Nefedov S.I. Interference pattern analysis of resolution bin in surveillance spatial coherent MIMO radar systems with beamea antennas. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2011, no. 11. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/248808.html> , accessed 01.05.2015. (in Russian).
10. Slukin G.P., Chapurskii V.V. Spatially multichannel distant range radar with high resolution. *Radiotekhnika = Radioengineering*, 2013, no. 11, pp. 24-34. (in Russian).