

УДК 621.396.96

А.С. Дудуш

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ЦЕЛЕЙ В МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ МІМО РЛС

В статье предложен алгоритм определения пространственных координат целей в многопозиционных радиолокационных системах на основе МІМО РЛС, отличающийся от известных учетом пространственной корреляции оценок "первичных координат" и использованием функций выбора измерений на каждой базе. Это позволяет, при двухэтапных алгоритмах оценки координат целей в многопозиционных РЛС, частично компенсировать обусловленные линеаризацией поверхностей положения цели систематические ошибки измерений, и осуществить выбор комбинации оценок "первичных координат", которая обеспечит наивысшую результирующую точность измерений для заданной конфигурации многопозиционной РЛС и вектора состояния цели. Показаны результаты имитационного моделирования, которые подтверждают эффективность предложенного алгоритма.

**Ключевые слова:** многопозиционная РЛС, МІМО РЛС, двухэтапный алгоритм измерения координат, пространственная корреляция, компенсация систематических ошибок.

### Введение

**Постановка проблемы.** Постоянный рост требований к качеству радиолокационной информации о воздушных объектах требует поиска эффективных методов ее получения и обработки. Один из путей решения этой задачи состоит в объединении средств радиолокационной разведки в многопозиционные радиолокационные системы (МПРЛС) [1]. Известно, что зная хотя бы три поверхности положения, соответствующие измеренным параметрам сигналов от цели, и используя зависимости между взаимным размещением позиций МПРЛС относительно цели, можно определить ее пространственные координаты [2]. Но, как правило, в МПРЛС существует возможность получения избыточной информации о цели (увеличения числа степеней свободы), что позволяет повысить результирующее качество измерений. Описанный случай является характерным для МПРЛС с кооперативным приемом информации, которые характеризуются наиболее высокими энергетическими и информационными характеристиками. Реализация данного типа МПРЛС, а также решение сложной проблемы "погони за импульсом" [3] возможны за счет применения так называемых МІМО (multiple input - multiple output – "много входов - много выходов") РЛС [4 – 6], основным отличием которых от хорошо известных РЛС с фазированными антенными решетками есть взаимная ортогональность сигналов в каждом из передающих и (или) приемных каналов. Для таких МПРЛС, которые имеют  $n$  позиций, количество степеней свободы будет не меньше  $n^2$ . Это делает процесс определения координат цели с использованием всей полученной информации достаточно сложным и громоздким.

Причем, в ряде случаев, прирост результирующей точности определения координат за счет использования избыточной информации является незначительным. Поэтому актуальным является решение задачи эффективного использования полученной избыточной радиолокационной информации в таких системах.

**Анализ литературы.** Вопросы определения координат в различного вида МПРЛС с кооперативным приемом информации (на основе МІМО РЛС) описаны в [1, 5, 6, 7].

В [6] описываются алгоритмы так называемого "централизованного обнаружения", когда принятие решения о наличии и оценка координат цели осуществляются на основе совместной обработки сигналов и шумов из всех выходных каналов после детектирования. Это является достаточно дорогостоящей и непрактичной процедурой, поскольку требует наличия больших вычислительных мощностей и широкополосных линий передачи данных.

В [5] показано, что наиболее рациональным вариантом обработки информации в таких системах является применение "децентрализованного обнаружения" при оптимальном решающем правиле и использовании двухэтапных алгоритмов определения координат цели [1]. Его суть, при наличии избыточной информации, заключается в решении статистической задачи нахождения оптимальной оценки вектора состояния цели методом максимума правдоподобия (при условии нормального закона распределения ошибок измерений) на основе полученных в каждой позиции оценок параметров сигналов (вектора оценок "первичных координат"). Причем все поверхности положения цели в пределах определенного априори объема пространства лине-

аризуются, что обуславливает возникновение систематических ошибок (СО) измерений.

В [7] применительно к пассивным МПРЛС предложен алгоритм, позволяющий уменьшить СО и получить высокие точности определения координат источников радиолокационного излучения за счет коррелированности измерений при совместной оценке угловых координат и разности дальностей в каждой из позиций и использования функций выбора совокупности измерений на базах. Приведенные здесь результаты статистического имитационного моделирования показали высокую эффективность такого подхода. Поэтому **целью статьи** является разработка алгоритма определения пространственных координат целей в многопозиционных радиолокационных системах на основе ММО РЛС, который позволит получить высокую точность определения координат и обеспечит уменьшение систематических ошибок измерений, обусловленных линейризацией поверхностей положения цели.

**Изложение основного материала**

Рассмотрим МПРЛС (рис. 1), позиции которой размещены на горизонтальной плоскости и представляют собой  $n$  однопозиционных РЛС, в каждую из которых дополнительно введены  $n-1$  каналов бистатического приема [3]. Тогда на каждой  $i$ -й позиции может быть сформирован вектор оценок "первичных координат" цели  $\xi_i$ , составляющими которого в общем случае будут оценки дальности  $\hat{R}_{ti}$ , азимута  $\hat{\beta}_{ti}$  и угла места  $\hat{\epsilon}_{ti}$ , полученные в ре-

зультате однопозиционного приема, и  $n-1$  оценок суммы дальностей РЛС  $i$  – цель – РЛС  $j$   $\hat{R}_{\Sigma ij}$ , полученных в результате бистатического приема сигнала на  $j$ -й позиции ( $i, j = \overline{1, n}; i \neq j$ ). Сумма дальностей РЛС  $i$  – цель – РЛС  $j$ , полученная на каждой  $i$ -й позиции МПРЛС, в полярной системе координат может быть представлена как:

$$R_{\Sigma ij} = \sqrt{R_i^2 + L_{ij}^2 + 2R_i L_{ij} \cos \epsilon_j \cos(\beta_j - \beta_{ij})} + R_i + L_{ij}$$

где  $L_{ij}$  – расстояние между  $i$ -й и  $j$ -й позициями (база);  $\beta_{ij}$  – азимут базы  $ij$  в местной полярной системе координат  $i$ -й позиции.

Допустим, что обеспечивается пространственная корреляция оценок дальности и суммы дальностей на каждой измерительной базе. Известно, что она зависит, прежде всего, от соотношения средней ширины лепестка диаграммы рассеяния цели и углом между направлениями от цели на разнесенные позиции МПРЛС. Для любой пары приемных позиций при облучении цели одной передающей позицией, совмещенной с приемной, высокая пространственная корреляция эхо-сигналов будет обеспечиваться при выполнении условия [1]

$$\frac{L_{эф}}{R} \leq (0.14 \dots 0.24) \frac{\lambda}{l_c}, \tag{1}$$

где  $L_{эф}$  – эффективная база между позициями;  $R$  – дальность цели от середины эффективной базы;  $\lambda$  – длина волны;  $l_c$  – поперечный размер цели (параллельный эффективной базе).

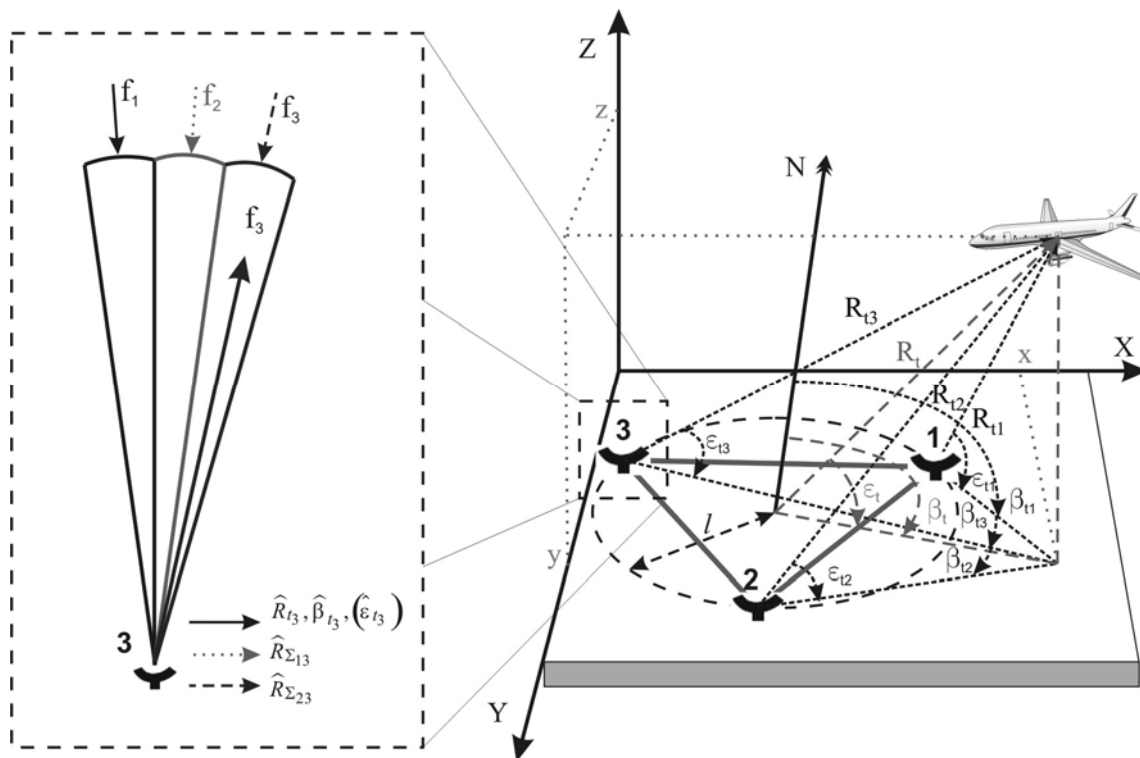


Рис. 1. Многопозиционная радиолокационная система на основе ММО РЛС

Возможность получения высокой точности оценки временного положения сигналов и ее линейная независимость, а также, в ряде случаев, отсутствие информации об угловом положении цели, делают целесообразным использование оценок дальности и суммы дальностей для формирования оценки вектора состояния цели, а полученные при однопозиционном приеме оценки угловых координат использовать для устранения неопределенности и отождествления измерений.

Учитывая отмеченные выше предположения, на каждой позиции МПРЛС могут быть найдены оценки направляющих косинусов между линиями наклонной дальности и каждой измерительной базой по соотношению:

$$\cos \hat{\theta}_{ij} = \left[ 1 - \frac{\hat{R}_{\Sigma ij} - 2\hat{R}_i}{L_{ij}} \cdot \left( \frac{2L_{ij} - \hat{R}_{\Sigma ij} + 2\hat{R}_i}{2\hat{R}_i} \right) \right]. \quad (2)$$

Используя значения оценок (2) находятся оценки азимута цели относительно каждой позиции МПРЛС, для чего необходимо иметь, по меньшей мере, два направляющих косинуса в каждой из позиций. Тогда, учитывая, что цель наблюдается под одинаковыми углами места для всех баз, выходящих из одной позиции, для каждой пары смежных баз в местной системе координат  $i$ -й позиции оценка азимута цели может быть найдена как:

$$\hat{\beta}_i = \arctan \left( \frac{\cos \hat{\theta}_{ij+1} \cdot \cos \beta_{ij} - \cos \hat{\theta}_{ij} \cdot \cos \beta_{ij+1}}{\cos \hat{\theta}_{ij} \cdot \sin \beta_{ij+1} - \cos \hat{\theta}_{ij+1} \cdot \sin \beta_{ij}} \right). \quad (3)$$

Используя оценки (2, 3) могут быть найдены значения оценок угла места относительно каждой позиции как среднее арифметическое  $n-1$  оценок, рассчитанных относительно каждой базы

$$\hat{\varepsilon}_i = \arccos \frac{1}{n-1} \sum_j \cos \hat{\theta}_{ij} / \cos(\hat{\beta}_i - \beta_{ij}). \quad (4)$$

Для управления потоком данных предварительно выбираются и вводятся в алгоритм формирования оценки вектора состояния цели функции выбора измерений на базах

$$s_{k_i}(\hat{\beta}_i, \beta_{ij}, b_i), \quad (5)$$

где  $k_i = \beta_i, \varepsilon_i$  – индекс, который определяет соответствующую принадлежность функции выбора оценок азимута или угла места на  $i$ -й позиции;  $b_i$  – азимуты биссектрис углов, образованных в точке пересечения мнимых линий баз, вместе с которыми они разделяют пространство вокруг каждой позиции на 8 секторов. Функции (5) принимают значение «1» в случае, когда числовые величины оценок угловых координат цели попадают в секторы, в пределах которых наиболее точно измеряется соответствующая угловая координата ( $s_{\beta_i} = 1$  если оценка  $\hat{\beta}_i$  находится в пределах секторов, которые ограничивают

пространство вокруг нормали к базе  $ij$ , а  $s_{\varepsilon_i} = 1$  – вокруг мнимой линии базы  $ij$ ). Во всех остальных случаях функции принимают значение «0»; при этом всегда должны выполняться условия:

$$\sum_{i=1}^n s_{k_i}(\hat{\beta}_i, \beta_{ij}, b_{ij}) = 1, \quad \prod_{i=1}^n s_{k_i}(\hat{\beta}_i, \beta_{ij}, b_{ij}) = 0.$$

Для формирования оценки вектора состояния цели на каждой позиции осуществляется выбор оценок дальности азимута и угла места цели:

$$\hat{R}_t = \min \hat{R}_i, \quad \hat{\beta}_t = \sum \hat{\beta}_i s_{\beta_i}, \quad \hat{\varepsilon}_t = \sum \hat{\varepsilon}_i s_{\varepsilon_i}. \quad (6)$$

Полученные с использованием (6) оценки пересчитываются относительно начала координат в местную систему координат МПРЛС.

Поскольку на практике по каждой цели за момент времени ее нахождения в пределах основного лепестка диаграммы направленности антенн можно получить некоторую совокупность  $n \times m$  векторов оценок «первичных координат», то, в результате применения предложенного метода, получим матрицу оценок векторов состояния цели размерности  $3 \times m$ . При заданном законе распределения ошибок измерений по данным матрицы оценок находятся математические ожидания, дисперсии и СО оценок составляющих вектора состояния цели  $\hat{\alpha}(t)^T = (\hat{R}_t, \hat{\beta}_t, \hat{\varepsilon}_t)$ .

Для оценки указанных выше характеристик была разработана математическая модель МПРЛС, состоящей из трех ММО РЛС, расположенных в вершинах треугольника, вписанного в окружность радиуса  $l$  с центром в начале системы координат (рис. 1). Пусть позиции МПРЛС имеют координаты в полярной системе координат  $(l \sin \beta_n, l \cos \beta_n, 0)$ , где  $\beta_n = 2\pi(n-1)/3 + 60^\circ$ ,  $n = \overline{1,3}$  – азимут  $n$ -й позиции.

Допустим, что средние квадратические отклонения (СКО) измерений временного положения сигналов  $\sigma_\tau$  на каждой позиции одинаковы. Тогда СКО измерений дальности  $\sigma_R = c\sigma_\tau/2$ , а СКО измерений суммы дальностей на каждой базе, при условии отсутствия ошибок временной синхронизации позиций МПРЛС,  $\sigma_{R_\Sigma} = c\sigma_\tau / (2 \cos(\varphi/2))$  где  $\varphi$  – угол между фокальными радиус-векторами [2, 3]. При выполнении условия (1) величина  $\cos(\varphi/2) \rightarrow 1$ , поэтому для дальнейших расчетов примем, что  $\sigma_{R_\Sigma} = c\sigma_\tau/2 = \sigma_R$ , а полученные на каждой позиции составляющие векторов оценок «первичных координат» цели распределены по нормальному закону с нулевым средним и дисперсиями  $\sigma_R^2$ .

Методом статистического имитационного моделирования проведена оценка потенциальной точности определения пространственных координат цели и величины СО, которые обеспечиваются при использовании разработанного алгоритма. Результа-

ты оценки потенциальной точности измерений представлены на рис. 2, 3 с использованием предложенных в [5] азимутальных зависимостей нормированных линейных СКО без учета СО.

На рис. 2 изображены азимутальные зависимости нормированной линейной СКО измерения азимута  $R_t \cos \varepsilon_t \sigma_{\beta_t} / (R_t/l) \sigma_R$  для разных значений угла места цели. Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы:

- применение предложенного алгоритма позволяет получить высокие точности определения азимута цели (для сравнения: при  $R_t = 200$  км,  $R_t/l = 10$ ,  $\sigma_R = 5$  м,  $\varepsilon_t = 12^\circ$  обеспечивается линейная СКО азимутального положения цели не хуже 58 м, а угловая –  $1.04'$ , в то время как предложенный в [5] при аналогичных начальных условиях обеспечивает СКО соответственно 134 м и  $2.3'$ );

- с увеличением угла места цели наблюдается незначительный прирост величины  $\sigma_{\beta_t}$ , причем величина прироста уменьшается обратно пропорционально росту угла места;

- на азимутах, которые совпадают с азимутами нормалей к базам, значения величины  $\sigma_{\beta_t} \rightarrow 0$  не зависят от угла места цели.

На рис. 3 изображены азимутальные зависимости нормированной линейной СКО измерения угла места  $R_t \sigma_{\varepsilon_t} / (R_t/l) \sigma_R$  для разных значений угла места цели. Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы:

- при заданном векторе состояния для целей под малыми углами места СКО измерения угла места  $\sigma_{\varepsilon_t}$  значительно превышает СКО измерения азимута (например, при тех же условиях, которые использовались для анализа рис. 2, линейная СКО измерения высоты цели будет не хуже 500 м, а угловая –  $8.16'$ );
- с уменьшением угла места цели наблюдается рост величины  $\sigma_{\varepsilon_t}$ .

Результаты проведенного анализа свидетельствуют, что определяющей характеристикой точности МПРЛС, предназначенных для работы по целям под малыми углами места, является величина  $\sigma_{\varepsilon_t}$ . Поэтому для дальнейшего анализа выберем СО измерения угла места  $\Delta \varepsilon$ .

На рис. 4 изображены азимутальные зависимости отношения СО измерения угла места к СКО  $|\Delta \varepsilon| / \sigma_{\varepsilon_t}$ . Из графиков видно, что предложенный метод позволяет почти полностью компенсировать СО  $\Delta \varepsilon$  и получить несмещенную оценку угла места

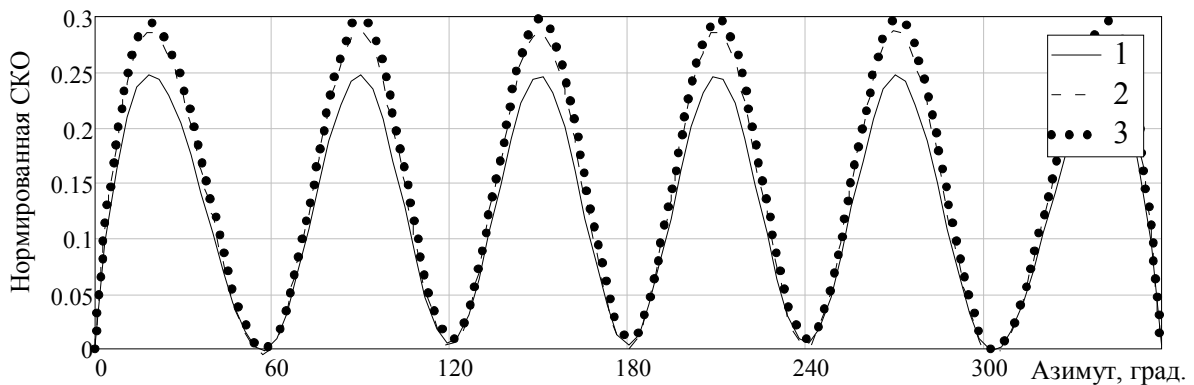


Рис. 2. Азимутальные зависимости нормированной линейной СКО измерения азимута  $R_t \cos \varepsilon_t \sigma_{\beta_t} / (R_t/l) \sigma_R$ : 1 –  $\varepsilon_t = 3^\circ$ ; 2 –  $\varepsilon_t = 6^\circ$ ; 3 –  $\varepsilon_t = 12^\circ$ .

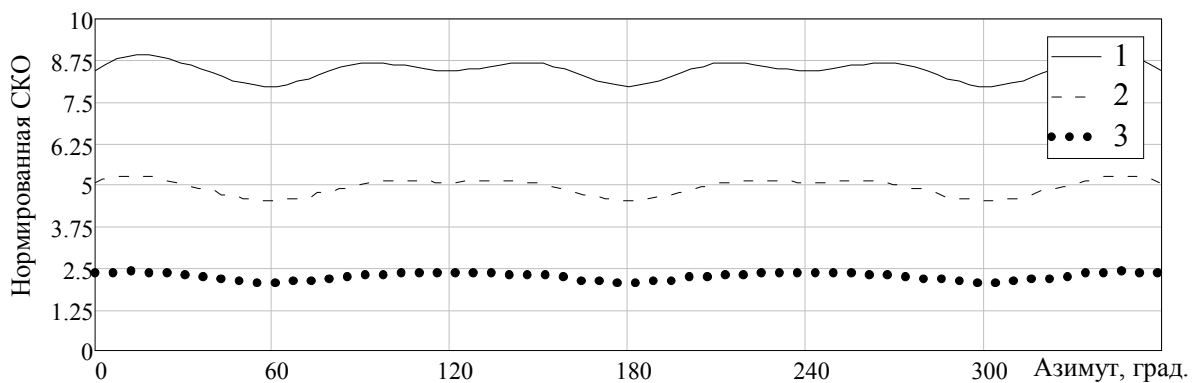


Рис. 3. Азимутальные зависимости нормированной линейной СКО измерения угла места  $R_t \sigma_{\varepsilon_t} / (R_t/l) \sigma_R$ : 1 –  $\varepsilon_t = 3^\circ$ ; 2 –  $\varepsilon_t = 6^\circ$ ; 3 –  $\varepsilon_t = 12^\circ$ .

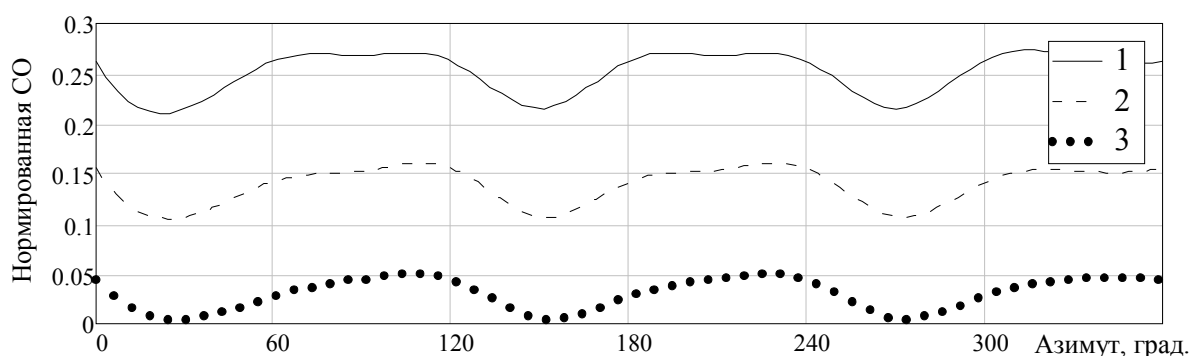


Рис. 4. Азимутальные зависимости относительной систематической ошибки измерения угла места

$$|\Delta_\varepsilon|/\sigma_{\varepsilon_t} : 1 - \varepsilon_t = 3^\circ; 2 - \varepsilon_t = 6^\circ; 3 - \varepsilon_t = 12^\circ.$$

цели при  $\varepsilon_t \geq 12^\circ$ . В то время как при  $\varepsilon_t = 3^\circ$  и  $\varepsilon_t = 6^\circ$  обеспечивается  $|\Delta_\varepsilon|/\sigma_{\varepsilon_t} \leq 27\%$  и  $|\Delta_\varepsilon|/\sigma_{\varepsilon_t} \leq 16\%$  соответственно.

### Выводы

В статье предложен алгоритм определения пространственных координат целей в многопозиционных радиолокационных системах на основе ММО РЛС, который отличается от известных учетом пространственной корреляции оценок “первичных координат” и использованием функций выбора измерений на каждой базе. Результаты проведенного имитационного моделирования показали, что применение данного алгоритма позволяет повысить результирующую точность определения пространственных координат целей в таких системах и обеспечивает компенсацию обусловленных линеаризацией поверхностей положения цели систематических ошибок измерений для заданной конфигурации МПРЛС и вектора состояния цели.

### Список литературы

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения / Сайбель А.Г. – М.: Оборонгиз, 1958. – 55 с.
3. Willis N.J. Bistatic radar, 2nd edition / Nicholas J. Willis. – USA: SciTech Publishing, 2005. – 329 p.
4. Черняк В.С. О новом направлении в радиолокации / В.С. Черняк // Прикладная радиоэлектроника. – 2009. – №4 (том 8). – С. 477 – 489.
5. Черняк В.С. Многопозиционные радиолокационные системы на основе ММО РЛС / В.С. Черняк // Успехи современной радиоэлектроники. – 2012. – №8. – С. 29 – 46.
6. MIMO Radar Signal Processing / Edited by Jian Li and Petre Stoica – New Jersey: Wiley, 2009. – 448 p.
7. Седьшиев П.Ю. Итерационные алгоритмы несмещенного оценивания координат излучающих источников в многобазовых комплексах пассивной радиолокации / П.Ю. Седьшиев // Сб. научн. тр. ОНДИ. – X., 2006. – Вып. 3(3). – С. 104 – 113.

Поступила в редколлегию 7.05.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Кобзев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВИХ КООРДИНАТ ЦІЛЕЙ В БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ММО РЛС

А.С. Дудуш

В статті запропонований алгоритм визначення просторових координат цілей в багатопозиційних радіолокаційних системах на основі ММО РЛС, який відрізняється від існуючих врахуванням просторової кореляції оцінок “первинних координат” та використанням функцій вибору вимірювань на кожній базі. Це дозволяє, при двоетапних алгоритмах оцінки координат цілей в БПРЛС, частково компенсувати обумовлені линеаризацією поверхонь положення цілі систематичні похибки вимірювань, та здійснити вибір комбінації оцінок “первинних координат”, яка забезпечить найвищу результируючу точність вимірювань для заданої конфігурації БПРЛС та вектору стану цілі. Приведені результати статистичного імітаційного моделювання, які підтверджують ефективність запропонованого алгоритму.

**Ключові слова:** багатопозиційні РЛС, ММО РЛС, двоетапний алгоритм вимірювання координат, просторова кореляція, компенсація систематичної похибки.

### TARGET'S SPATIAL COORDINATE MEASURING IN MULTISITE (MULTISTATIC) RADAR SYSTEMS CONSISTING OF MIMO RADARS

A.S. Dudush

In the article target's spatial coordinate measuring algorithm in multisite (multistatic) radar systems (MSRSs) consisting of MIMO radars are proposed. Main features of this method are taking into account spatial correlation of target's “primary coordinates” estimates and use of measurement selection functions on each base. This allows, when using two-stage coordinate measuring algorithms, partially compensate systematic errors, specified by coordinate surfaces linearization, and select “primary coordinates” estimates, that provide highest total accuracy for given MSRS configuration and state vector of target. Statistical modeling results are demonstrated, that confirm efficiency of proposed algorithm.

**Keywords:** multisite (multistatic) radar systems, MIMO radars, two-stage coordinate measuring algorithm, spatial correlation, systematic error compensation.