

УДК 621.396.96

Концептуальная модель разнесенной системы радиолокационного наблюдения сложных маневрирующих баллистических целей

Ашурков И.С.*, Лешко Н.А., Цыбульник А.Н.*****

Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,

Московский проспект, 28, Ярославль, 150001, Россия

**e-mail: ivan_ashurkov@mail.ru*

***e-mail: nikolai_zru@mail.ru*

****e-mail: tsan1956@mail.ru*

Аннотация

В статье приведено описание модели разнесенной радиолокационной системы с некооперируемыми источниками излучения, приемный пункт которой интегрирован с национальными техническими средствами контроля испытаний стратегических ракетно-космических вооружений зарубежных государств. Использование модели позволит в интересах расширения разведывательно-информационных возможностей выбрать рациональный вариант применения национальных технических средств контроля в финишных районах испытательных ракетных полигонов иностранных государств. Представлены результаты решения задачи оптимизации расположения национальных технических средств контроля в целях удовлетворения требований к точностным показателям системы.

Ключевые слова: разнесенная радиолокационная система, некооперируемый источник подсвета, национальные технические средства контроля.

Введение

Контроль деятельности полигонов иностранных государств, при испытании ракетно-космического вооружения с целью получения объективных данных о технических характеристиках, тактике применения и других показателях этого вооружения, осуществляется с применением национальных технических средств контроля (НТСК). Территориальное расположение финишных районов испытательных ракетных полигонов (ИРП) иностранных государств [1, 2] обосновывает использование НТСК морского базирования.

Особенности работы НТСК в финишном районе ИРП определены международными соглашениями и рядом других объективных и субъективных факторов. Наиболее существенным условием, осложняющим процесс получения информации средствами контроля, является запрет на излучение в финишном районе ИРП (пространственные ограничения на излучение).

Тем не менее, получение данных о новых и перспективных образцах ракетно-космического вооружения в процессе контроля деятельности ИРП в информационном плане наиболее продуктивно. В финишных районах ИРП иностранных государств разнообразную информацию о ракетно-космических вооружениях (траекторную и сигнальную) можно получить, используя сигналы различных радиолокационных станций полигонов, в том числе многофункциональных (МФ РЛС), и других радиоэлектронных средств (РЭС), а также радиоизлучений элементов самих испытываемых ракетных комплексов.

Таким образом, пространственные ограничения на излучение в финишном районе ИРП обосновывают получение достоверных данных о состоянии и

тенденциях ракетно-космического вооружения в скрытном режиме, без использования собственных источников радиоизлучения.

Постановка задачи

В статье приводится описание модели разнесенной радиолокационной системы с некооперируемыми источниками излучения, интегрированной в комплекс национальных технических средств контроля испытаний ракетно-космического вооружения. Модель на основе расчета пространственных (вероятность правильного обнаружения) и точностных (среднеквадратическая ошибка измерения координат) характеристик элементов сложной баллистической цели (СБЦ) позволяет выбрать рациональный вариант применения комплекса НТСК в финишном районе ИРП иностранных государств.

Описание модели

В общем виде математическая имитационно-аналитическая модель системы представляется в виде взаимосвязанной структуры, представленной на рисунке 1. В состав модели системы входит ряд блоков и моделей.

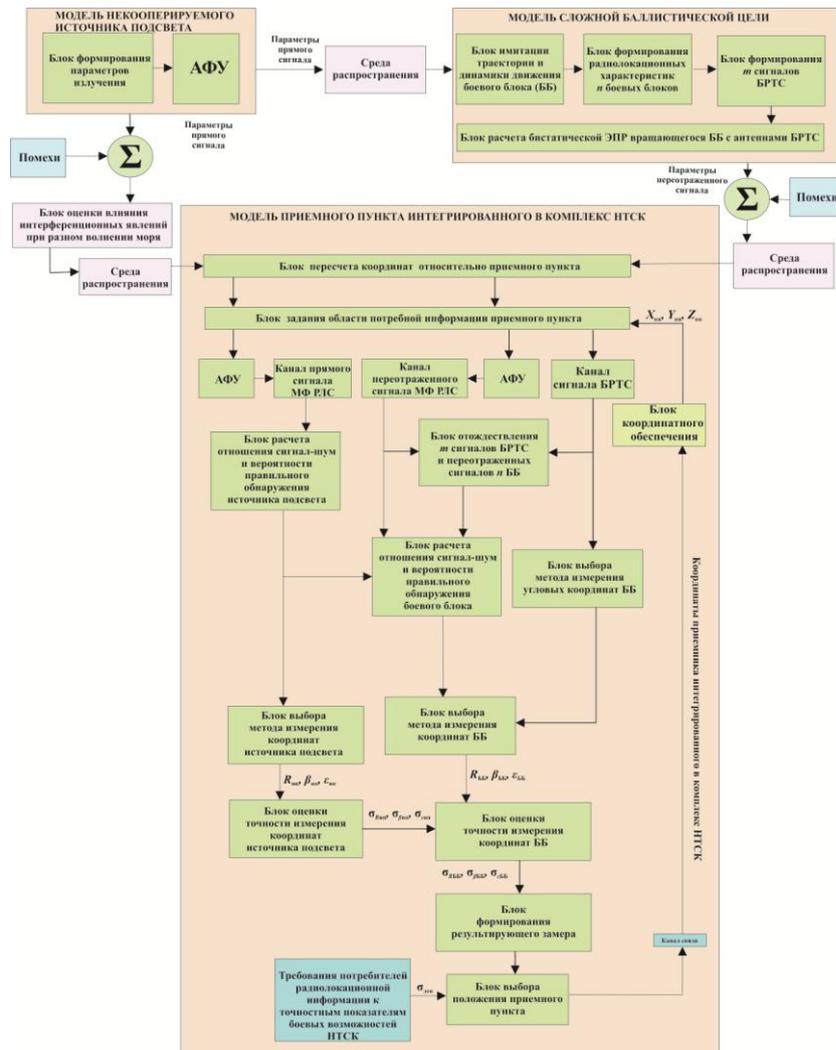


Рис. 1. Структура модели разнесенной радиолокационной системы с некооперируемыми источниками излучения

Модель некооперируемого источника подсвета включает в состав два блока:

блок формирования параметров излучения (параметров зондирующих сигналов РЛС полигона – некооперируемого источника подсвета) и блок АФУ (имитации её антенно-фидерного устройства).

Блок формирования параметров излучения некооперируемого источника

подсвета. Описывается вектором $\bar{\xi}_I = \{P_{\text{ин}}, f_{\text{ин}}, G_{\text{ин}}, G_{\text{бл. ин}}, \Delta f_{\text{ин}}, \tau_{\text{и}}\}^T$ – вектор параметров некооперируемого источника подсвета, где $P_{\text{ин}}$ – импульсная мощность источника подсвета, $f_{\text{ин}}$ – центральная частота, $G_{\text{ин}}$ – коэффициент усиления антенны

источника подсвета, $G_{\text{блип}}$ – уровень боковых лепестков, $\Delta f_{\text{ип}}$ – ширина спектра зондирующего сигнала, $\tau_{\text{и}}$ – длительность импульса.

Модель СБЦ включает в состав блок формирования радиолокационных характеристик n элементов боевого оснащения (ЭБО) СБЦ, блок формирования m сигналов их бортовой радиотелеметрической системы (БРТС), блок имитации траектории и динамики движения элементов СБЦ и блок расчета их бистатической эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) с учетом антенн БРТС.

На рисунке 2 изображены: НТСК корабельного базирования с приемным пунктом разнесенной радиолокационной системы на борту; некооперируемая РЛС полигона, являющаяся источником излучения разнесенной системы; траектория СБЦ и её трасса – проекция на земную поверхность, которая считается плоской. Указана ортогональная земная система координат $OXYZ$. В начале системы координат – НТСК. Пересчет координат траектории элементов СБЦ проводится относительно приемного пункта НТСК.

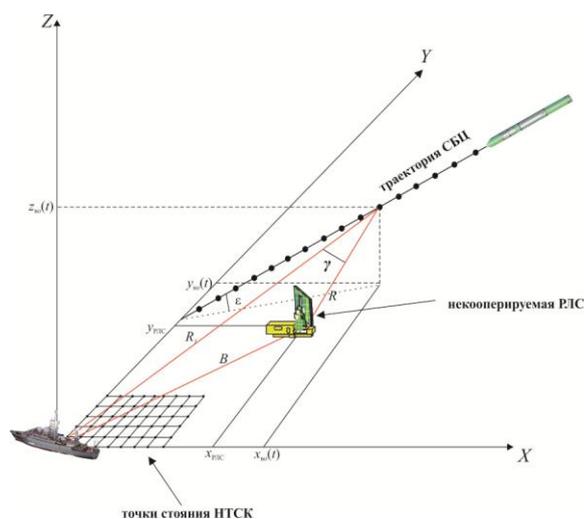


Рис. 2. Иллюстрация разнесенной радиолокационной системы

Блок имитации траектории и динамики движения ЭБО СБЦ. В блоке траектория движения элементов СБЦ может задаваться произвольной, в частном случае прямолинейной

$$\begin{aligned}x_{\text{СБЦ}}(t) &= x_{\text{СБЦ}0} + v_{x_{\text{СБЦ}}} t, \\y_{\text{СБЦ}}(t) &= y_{\text{СБЦ}0} + v_{y_{\text{СБЦ}}} t, \\z_{\text{СБЦ}}(t) &= z_{\text{СБЦ}0} + v_{z_{\text{СБЦ}}} t.\end{aligned}\tag{1}$$

где $x_{\text{СБЦ}0}, y_{\text{СБЦ}0}, z_{\text{СБЦ}0}$ – координаты начального положения СБЦ (в момент t_0);

$v_{x_{\text{СБЦ}}}, v_{y_{\text{СБЦ}}}, v_{z_{\text{СБЦ}}}$ – скорости СБЦ в декартовой системе координат.

Высота элемента сложной баллистической цели на траектории движения взаимосвязана через угол встречи его с Землей ε

$$z_{\text{СБЦ}} = y_{\text{СБЦ}} \tan \varepsilon.\tag{2}$$

задается в соответствии с основными параметрами полёта СБЦ в условиях отсутствия аэродинамического сопротивления согласно данным таблицы 1.

Таблица 1

Дальность полёта, км	Высота траектории, км	Скорость в конце АУ, м/с	Время полёта, мин	Угол встречи с Землёй, град
1 000	260	3 100	9	45
2 000	460	4 000	12	44
3 000	650	4 800	15	42
4 000	820	5 400	18	41
5 000	970	5 900	21	40
6 000	1 100	6 300	24	38
7 000	1 190	6 600	26	37
8 000	1 270	6 850	29	35
9 000	1 300	7 100	31	34
10 000	1 320	7 300	33	32
12 000	1 370	7 500	36	27

На траектории ЭБО СБЦ стабилизируется вращением с задаваемой скоростью относительно продольной оси.

Блок формирования радиолокационных характеристик n элементов боевого оснащения СБЦ. В блоке задаются размеры и параметры n ЭБО СБЦ с антеннами БРТС в соответствии с рисунком 3.

Исходные данные – размеры боевого блока H , D и γ , количество блоков M и положение антенн на его поверхности, определяемое удалением ℓ антенны от вершины ЭБО СБЦ. Размеры антенны d_1 и d_2 , соответствующие диапазону рабочих частот передатчиков БРТС $f_{\text{РТС}}=2,2\dots2,3$ ГГц и информация о форме ЭБО СБЦ.

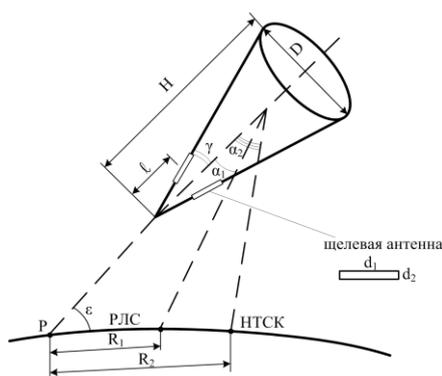


Рис. 3. Расположение и основные обозначения модели ЭБО СБЦ

Блок формирования m сигналов БРТС. В блоке задаются сигналы бортовой радиотелеметрической системы, используемые для обнаружения и сопровождения по угловым координатам элемента СБЦ.

Блок расчета бистатической ЭПР вращающегося ЭБО с антеннами БРТС. В рассматриваемом блоке расчет бистатической ЭПР осуществляется в три этапа.

На первом этапе выделяются основные отражающие элементы конструкции (корпус элемента, антенны БРТС). Поскольку в методе эквивалентов и в физической теории дифракции суммарные токи, поля и комплексные коэффициенты отражения

рассматриваются как простые суперпозиции элементарных токов, полей и коэффициентов отражения [3], задание указанных элементов производилось независимо. Таким образом ЭБО разбивается на составные элементы, каждый из которых представляет собой объект простейшей формы.

На втором этапе выделенные «основные» элементы конструкции аппроксимируются типовыми элементами – усеченным конусом (корпус), набором плоских пластин (антенны) [3].

ЭПР корпуса определялось выражением

$$\sigma_{\kappa} = \frac{2\sqrt{\pi}}{\lambda} \sqrt{\pi \sin \frac{H}{k}} \operatorname{sinch}(kH \sin \theta_0) \cos \theta_0, \quad (3)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, $\theta_0 = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \gamma)$.

ЭПР БРТС антенн – выражением

$$\sigma_A = \frac{2\sqrt{\pi}}{\lambda} d_1 d_2 \cos \theta \operatorname{sinch}(kd_1 \sin \theta_1) \operatorname{sinch}(kd_2 \sin \theta_2). \quad (4)$$

На третьем этапе находится величина ЭПР ЭБО СБЦ. Суммирование ЭПР элементарных отражателей для заданного ракурса объекта, движения по баллистической траектории и вращения относительно продольной оси, длины волны, облучающей РЛС, производится методом относительной фазы [3]. ЭПР ЭБО СБЦ в целом определяется выражением

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_K^2 + \sigma_A^2 + 2\sigma_K \sigma_A \cos(2kx). \quad (5)$$

Суммарная ЭПР ЭБО СБЦ складывается из ЭПР корпуса и ЭПР одной или двух антенн (предусмотрена возможность выбора) с учетом фаз отраженных сигналов.

Среда распространения прямого и переотраженного сигналов считается однородной и характеризуется вектором параметров, учитывающим потери при распространении радиоволн. Учет влияния тропосферы и ионосферы на распространение радиоволн в каналах РЛС–СБЦ–НТСК и РЛС–НТСК можно учесть с помощью коэффициента преломления, который зависит от метеопараметров (температуры, давления и влажности) [4].

Блок оценки влияния интерференционных явлений при разном волнении моря.

Результатом многократного переотражения от поверхности моря является «дрожание» фронта прямого сигнала, величина которого зависит от степени волнения моря. С увеличением отношения сигнал-шум степень влияния интерференционных явлений уменьшается.

Модель приемного пункта, интегрированного в комплекс НТСК включает в себя ряд блоков.

Блок пересчета координат. В блоке осуществляется пересчет координат некооперируемой РЛС и ЭБО СБЦ относительно приемного пункта НТСК в декартовой системе координат.

Блок формирования области потребной информации приемного пункта.

Область потребной информации (местоположение приемного пункта НТСК корабельного базирования) задается в варьируемых пределах через переменные $X_{тр}$, $Y_{тр}$.

Антенно-фидерное устройство (АФУ). Позволяет вводить значение коэффициента усиления антенны и изменять структуру диаграммы направленности антенны.

$$G(\beta, \varepsilon) = G_{max} F^2(\beta, \varepsilon). \quad (6)$$

где $G(\beta, \varepsilon)$ – коэффициент усиления антенны по боковым лепесткам, G – коэффициент усиления антенны по главному лучу, $F^2(\beta, \varepsilon)$ – функция, описывающая нормированную диаграмму направленности антенны.

Прямые и отраженные от ЭБО СБЦ сигналы поступают на фоне аддитивных помех, задаваемых спектральными плотностями мощности $N_{пр}$ и $N_{отр}$, соответственно, сигнал от источника подсвета в *канал прямого сигнала*, а сигнал от элементов СБЦ в *канал сигнала БРТС* и *канал отраженного сигнала*, в котором осуществляется когерентная обработка. Каждый из каналов описывается набором векторов $\bar{\xi}_2 = \{G_{ПП}, \Delta f_{ПП}, K_{ш}, k, T_{эфф}\}^T$, где $\Delta f_{ПП}$ – полоса частот приемника (полоса частот приемника выбирается по условию, $\Delta f_{ПП} \geq 1.3 \cdot \Delta f_{ин}$); $G_{ПП}$ – коэффициент усиления антенны; $K_{ш}$ – коэффициент шума приемника, k – постоянная Больцмана, $T_{эфф}$ – эффективная температура приемника.

Блок расчета отношения сигнал-шум и вероятности правильного обнаружения источника подсвета. Выражение для расчета параметра обнаружения q^2 [5, 6]:

$$q^2 = \frac{P_{РЛС} G_{РЛС} G_{бл.РЛС} G_{ПП} \lambda^2 \eta_1 \eta_2 \eta_3}{(4\pi)^2 k T_{эфф} R^2}, \quad (7)$$

где λ – длина волны; η_1 – коэффициент потерь в фидерном тракте приемного устройства; η_2 – коэффициент потерь, учитывающий несовпадение поляризаций антенн источника подсвета и приемного пункта; R – расстояние от источника подсвета до приемного пункта.

Соответствующее q значение вероятности правильного обнаружения D в j -приемном пункте при заданном значении вероятности ложной тревоги определяется [5] как

$$D_j = F_{\text{лт}j}^{1/(1+0.5q^2)}. \quad (8)$$

для сигнала со случайной амплитудой, распределенной по закону Рэлея $w(A)$ и со случайной начальной фазой, распределенной по равномерному закону $w(\varphi)$

$$w(A) = \frac{A}{\sigma_A^2} \exp\left(-\frac{A^2}{\sigma_A^2}\right), A \geq 0; \quad (9)$$

$$w(\varphi) = \frac{1}{2\pi}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi.$$

Блок отождествления m сигналов БРТС и переотраженных сигналов n боевых блоков. В блоке осуществляется отождествление оценок угловых координат, полученных по сигналам БРТС, и оценок дальности до элементов СБЦ, полученных по переотраженным сигналам.

Блок расчета отношения сигнал-шум и вероятности правильного обнаружения боевого блока. Выражение для расчета параметра обнаружения q^2 [5]:

$$q^2 = \frac{P_{\text{РЛС}} G_{\text{РЛС}} G_{\text{ПП}} \lambda^2 \sigma(\gamma) \eta_4 |\rho|^2}{(4\pi)^3 k T_{\text{эфф}} R^2 R_1^2}, \quad (10)$$

где λ – длина волны; η_3 – коэффициент потерь на участке РЛС – СБЦ; η_4 – коэффициент потерь на участке СБЦ – НТСК; R_1 – расстояние от НТСК до СБЦ; R – расстояние от РЛС до СБЦ; k – постоянная Больцмана; $|\rho|^2$ – коэффициент потерь в отношении сигнал-шум из-за неопределенности параметров зондирующего сигнала, $\sigma(\gamma)$ – бистатистическая эффективная поверхность рассеяния.

Соответствующее q значение вероятности правильного обнаружения D в j -приемном пункте при заданном значении вероятности ложной тревоги определяется согласно выражению (8).

Блок выбора метода измерения угловых координат ЭБО СБЦ. Используемый метод измерения угловых координат связан с конструкцией антенной системы приемного пункта НТСК.

Блок выбора метода измерения координат источника подсвета. Задача измерения координат источника подсвета решается методами многократного пеленгования или с использованием спутниковых навигационных систем.

Блок выбора метода измерения координат ЭБО СБЦ. Выражение для расчета дальности до элементов СБЦ суммарно-дальномерно-пеленгационным способом следующее:

$$R = \frac{L(2B + L)}{2(L + B(1 - \cos\beta\cos\epsilon\cos\beta_n\cos\epsilon_n - \sin\beta\cos\epsilon\sin\beta_n\cos\epsilon_n - \sin\epsilon\sin\epsilon_n))}, \quad (11)$$

где L – суммарная дальность; B – базовое расстояние источник подсвета (ИП) и приемник, β_n и ϵ_n – азимут и угол места некооперируемого источника подсвета соответственно.

Блок оценки точности измерения координат источника подсвета. Для оценки точности измерения координат источника подсвета используется методика, приведенная в [7–9]. Дисперсионная матрица ошибок определения координат ИП D_α с элементами $\sigma_{\alpha k}^2$ определяется следующим выражением:

$$D_\alpha = QD_\lambda Q^T, \quad (12)$$

где Q – матрица Якоби производных с элементами $\partial f(\tilde{\lambda}_i) / \partial \lambda_j, \lambda_j(t) = [\lambda_1(t), \dots, \lambda_m(t)]^T$ – вектор первичных координат ИП, $m=1 \dots V$, V – количество первичных измерений, D_λ – дисперсионная матрица ошибок первичных измерений координат (ошибки первичных измерений независимы).

Блок оценки точности измерения координат ЭБО СБЦ. Оценка точности измерения координат ЭБО СБЦ проводится согласно выражению (12). При оценке точности измерения координат ЭБО СБЦ и РЛС необходимо учитывать ошибки, обусловленные рефракцией радиоволн [4].

Блок формирования результирующего замера. В блоке формируется суммарное СКО измерения координат ЭБО СБЦ $\sigma_{\alpha\Sigma}$ с учетом ошибок измерения координат РЛС. На рисунке 4 приведена зависимость суммарной СКО оценки дальности до ЭБО СБЦ от его положения на траектории полета для всех узлов координатной сетки заданной зоны возможных местоположений приемного пункта НТСК.

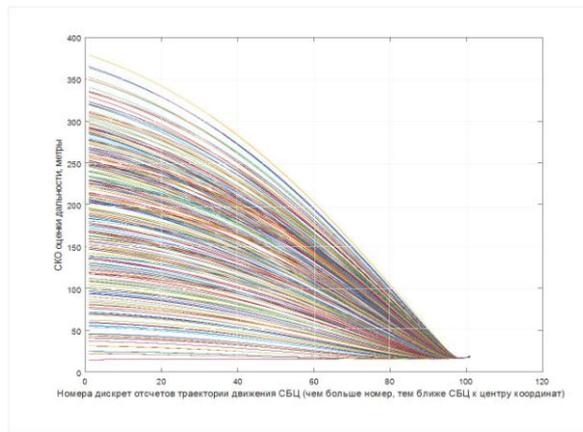


Рис. 4. Зависимость СКО оценки дальности до ЭБО СБЦ от его положения на траектории полета для различных местоположений приемного пункта НТСК

В блоке выбора положения приемного пункта НТСК решается задача оптимизации расположения приемного пункта в целях удовлетворения требований к точностным показателям системы. На рисунке 5 приведена зависимость среднеарифметического СКО оценки дальности (по критерию ее минимума) от номера дискрет на траектории движения.

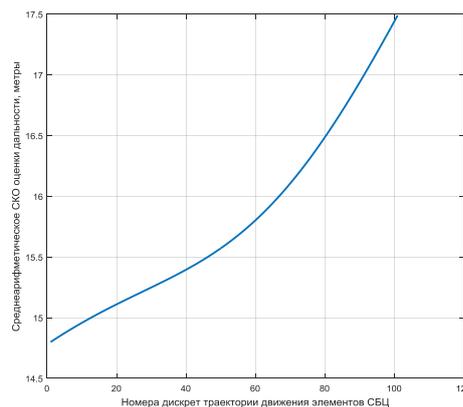


Рис. 5. Зависимость среднеарифметического СКО оценки дальности от номера дискрет на траектории движения цели

Критерий выбора местоположения приемного пункта следующий

$$\sigma_{\text{ср.арифм}}^2 = \min, \sigma_{\text{ср.арифм}}^2 = \frac{\sum_k \sigma_{\alpha\Sigma}^2}{k}, \quad (13)$$

где k – количество измерений.

После того, как осуществлен выбор координат по заданному критерию, они используются в качестве рекомендаций в блоке координатного обеспечения приемного пункта НТСК.

Выводы. Использование модели разнесенной радиолокационной системы с некооперируемыми источниками излучения, интегрированной в комплекс НТСК испытаний ракетно-космического вооружения иностранных государств, в отличие от известных [10–15], позволяет осуществить выбор рационального расположения и направления движения приемного пункта НТСК в финишном районе ИРП.

Библиографический список

1. Великанов В.Д. Радиотехнические системы в ракетной технике / Под ред. В.И. Галкина, И.И. Захарченко, Л.В. Михайлова. – М.: Воениздат, 1974. - 340 с.
2. Скуратовский П. Основные американские полигоны и другие ракетно-испытательные объекты. Тихоокеанской зоны // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 4. С. 59 - 65.
3. Ладыгин А.И. Анализ сигнатур. - М.: Университетская книга, 2008. - 256 с.
4. Сколник М. И. Справочник по радиолокации. В 2 книгах. – М.: Техносфера. 2014. Кн. 2. - 680 с.
5. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. - М.: Радио и связь, 1993. - 416 с.

6. Лешко, Н.А., Цыбульник А.Н. Радиотехническая разведка и скрытная радиолокация. - Ярославль: Изд-во ЯГПУ им. К.Д. Ушинского, 2006. - 152 с.
7. Ашурков И.С. Лешко Н.А., Цыбульник А.Н. Методика расчета рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы с посторонним источником подсвета // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2015. № 5 - 6. С. 87 - 91.
8. Лешко Н.А. Ашурков И.С. Расчет рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы по стороннему источнику подсвета // Труды МАИ. 2015. № 83. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62297>
9. Ульянов Г.Н., Павлов И.Н. Локальная система позиционирования объектов вооружения, военной техники и личного состава // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2008. № 1. С. 33 – 39.
10. Боев С.Ф., Ашурков И.С., Цыбульник А.Н. Имитационная модель многопозиционной радиолокационной системы с некооперируемым источником подсвета // Информация и космос. 2016. № 4 (6). С. 22 – 28.
11. Оводенко В.Б., Трекин В.В. Исследование эффективности компенсации влияния среды на работу радиолокационной станции // Труды МАИ. 2016. № 88. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=70690>
12. Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Алгоритм определения координат цели в просветном радиолокаторе с разнесенным приемом // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 1 (102). С. 28 - 35.
13. Силантьев А.Б., Красников А.В., Узденов Д.Д., Теряшов А.И. Обнаружение трасс целей в двухпозиционной радиолокационной станции // Вестник Ярославского

государственного университета им. П.Г. Демидова. Сер.: Естественные и технические науки. 2013. № 1. С. 46 - 51.

14. Ксендзук А.В., Фатеев В.Ф., Попов С.А. Неизлучающая радиолокационная система, основанная на приёме отражённых сигналов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 4. С. 60 - 65.

15. Ткачев Г.Н., Готовиц И.В., Крылов Б.Н. Возможности практической реализации схемы полуактивной радиолокации с независимым источником подсвета в коротковолновом диапазоне // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2011. № 4. С. 34 - 41.