Имитационная модель многопозиционной радиолокационной системы с некооперируемым источником подсвета

Imitation model of multi position radio-locating system with non-cooperated illumination source

Боев / Boev S.
Сергей Федорович
(boev@oaorti.ru)
доктор технических наук,
доктор экономических наук.
ОАО «Радиотехнический институт»,
генеральный директор.
г. Москва

Ашурков / Ashurkov I.
Иван Сергеевич
(ivan_ashurkov@mail.ru)
ЯВВУ ПВО, адъюнкт.
г. Ярославль

Цыбульник / Cybulnik A.
Александр Николаевич
(can1956@mail.ru)
кандидат технических наук, профессор.
ФГКВОУ ВО «Ярославское высшее военное училище ПВО» (ЯВВУ ПВО) МО РФ,
профессор кафедры электроники.
г. Ярославль

Ключевые слова: многопозиционная радиолокационная система – multi position radio-locating system; некооперируемый источник подсвета – non-cooperated illumination source; эффективность – efficiency; оптимизация – optimization.

В статье приводится описание модели многопозиционной радиолокационной системы с некооперируемым источником подсвета, отличающейся от известных введением в ее состав вынесенного устройства формирования сигналов подсвета с динамично изменяющимися априорно неизвестными координатами и параметрами излучения.
Представлены результаты ее применения для решения задачи оптимизации пространственной структуры системы.

The paper shows description of multi position radio-locating system model with non-cooperated illumination source that differs from those familiar by introducing in its makeup illumination signal generating remote unit with dynamically changing coordinates unknown apriori and emission parameters. Results of its application for resolving task in optimizing system spatial structure are given.

Проблема оценки качества функционирования радиолокационных систем состоит в том, что ни один отдельно взятый параметр, как технический, так и тактический, не характеризует ее полностью с точки зрения эффективности. Более того, любая жестко фиксированная совокупность параметров (численных значений) не дает адекватного представления относительно свойств радиолокационных систем в различных условиях.

Виду ограниченных возможностей использования для оценки эффективности многопозиционной радиолокационной системы натурных испытаний или физического моделирования практически единственным средством для получения такой оценки являются математические модели процесса ее функционирования. Использование аналитических моделей связано обычно с принятием существенных допущений, и, следовательно, с получением неточных оценок. Основной целью разработки любой модели является обеспечение возможности исследования отдельных свойств реальных объектов в специально задаваемых и контролируемых условиях.

Имитационное моделирование, в отличие от чисто математического, заключается в том, что имеет место определенное сходство воспроизводимого на ЭВМ процесса, описанного аналитическими и эмпирическими зависимостями, с реальными процессами моделируемой системы [1]. Это сходство возникает за счет идентичности возможных сочетаний состояний. Конструируя (проигрывая) общесистемные ситуации (например, варианты тактической обстановки, состава и характеристик налёта средств воздушного нападения (СВН), помеховой обстановки и т.п.) на ЭВМ, возможна имитация работы многопозиционной системы в различных условиях обстановки с целью оценки либо эффективности, либо оптимизации ее характеристик и параметров [2].

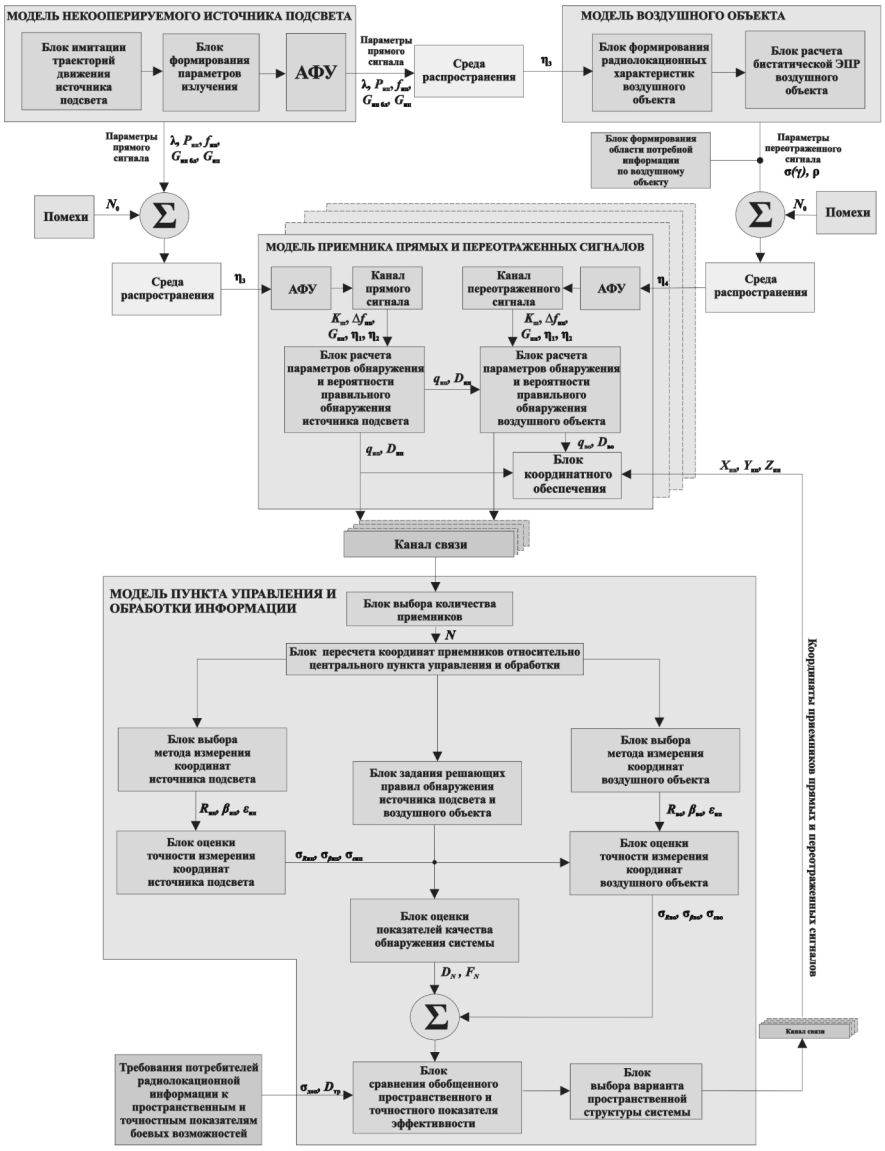

Рис. 1. Структурная схема модели многопозиционной радиолокационной системы с некооперируемым ИП

Модель многопозиционной радиолокационной системы с некооперируемым источником подсвета (МП РЛС с НИП) предназначена для расчета координат точек стояния приемных пунктов системы, обеспечивающих выполнение требований потребителей радиолокационной информации к пространственным и точностным показателям боевых возможностей системы.

В общем виде математическая имитационно-аналитическая модель системы представляется в виде взаимосвязанной структуры, представленной на рис. 1.

Модель некооперируемого источника подсвета включает в состав три блока: формирования параметров зондирующего сигнала некооперируемого источника подсвета, имитации его траектории и антенно-фидерное устройство (АФУ).

В блоке имитации траекторий движения источника подсвета формируется заданная траектория, вид которой в общем случае может быть произвольным. На рис. 2 изображены траектория источника подсвета и ее проекция на земную поверхность, которая считается плоской. Текущую дальность от приемного пункта (ПП) 1 до источника подсвета $B(t)$ можно рассматривать как функцию [3]

$$B(t_0+t)=\left[\left(x_{\text{пп}}-x_{\text{ип}}(t_0+t)\right)^2+\left(y_{\text{пп}}-y_{\text{ип}}(t_0+t)\right)^2+\left(z_{\text{пп}}-z_{\text{ип}}(t_0+t)\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

где $x_{\text{ип}}(t_0+t)$, $y_{\text{ип}}(t_0+t)$, $z_{\text{ип}}(t_0+t)$ – текущие координаты источника подсвета.

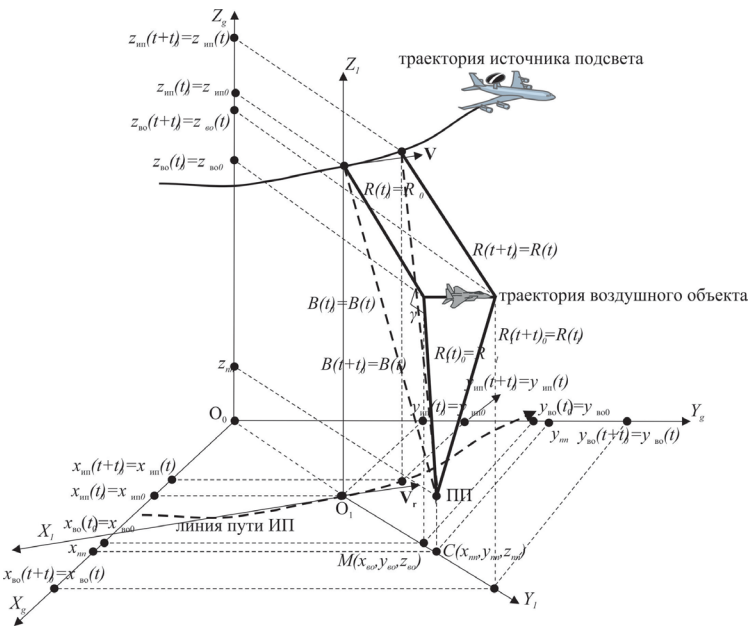

Рис. 2. Пояснение движения ИП по произвольной траектории

Выражая $B(t)$ через ряд Тейлора относительно момента времени $t=0$ и приняв $t_0=0$, получим выражение для произвольной траектории движения источника подсвета относительно приемного пункта

$$B(t)=B_0+\left.\frac{\partial B(t)}{\partial t}\right|_{t=0}t+\left.\frac{\partial^2 B(t)}{2\partial t^2}\right|_{t=0}t^2+$$

$$+\left.\frac{\partial^3 B(t)}{6\partial t^3}\right|_{t=0}t^3+\ldots+\left.\frac{\partial^{n+1}B(t)}{(n+1)!\partial t^{n+1}}\right|_{t=0}t^{n+1} \qquad (2)$$

Проведенный анализ боевого применения самолетов ДРЛОиУ в локальных войнах и вооруженных конфликтах показал, что траекторию их движения в зоне барражирования приближенно можно описать эллипсом, а на коротких участках в виде прямой линии [4]. В модели реализованы прямолинейная траектория движения некооперируемого источника подсвета и движение по эллипсу.

Блок формирования вектора параметров излучения некооперируемого источника подсвета $\xi_1=\{P_{ип}, f_{ип}, G_{ип}, G_{бл\,ип}, \Delta f_{ип}, \tau_и\}^T$, где $P_{ип}$ – импульсная мощность источника подсвета, $f_{ип}$ – центральная частота; $G_{ип}$ – коэффициент усиления антенны источника подсвета; $G_{блип}$ – уровень боковых лепестков, $\Delta f_{ип}$ – ширина спектра зондирующего сигнала, $\tau_и$ – длительность импульса.

Антенно-фидерное устройство. Позволяет вводить значение коэффициента усиления антенны и изменять форму диаграммы направленности антенны

$$G(\beta,\varepsilon)=G_{max}F^2(\beta,\varepsilon), \qquad (3)$$

где $G(\beta, \varepsilon)$ – коэффициент усиления антенны по боковым лепесткам, G_{max} – коэффициент усиления антенны по главному лучу, $F^2(\beta,\varepsilon)$ – функция, описывающая нормированную диаграмму направленности антенны. Используется также в модели приемника прямых и переотраженных сигналов.

Среда распространения сигналов прямого и переотраженного считается неоднородной и характеризуется вектором параметров $\xi_2=\{\eta_3,\eta_4\}^T$, учитывающим потери при распространении радиоволн, где η_3 – потери в канале распространения прямого сигнала, η_4 – потери в канале распространения переотраженного сигнала.

Модель воздушного объекта включает в состав блок формирования радиолокационных характеристик и блок расчета бистатической эффективной поверхности рассеяния (ЭПР).

Блок формирования радиолокационных характеристик воздушного объекта. Включает вектор параметров цели $\xi_3=\{\bar{\sigma}_{во}, n\}^T$, где $\bar{\sigma}_{во}$ – средняя эффективная поверхность рассеяния воздушного объекта (ВО), n – эмпирический коэффициент, определяемый конфигурацией и сложностью отражающего объекта.

Блок расчета бистатической ЭПР воздушного объекта. Бистатическая ЭПР рассчитывается согласно выражению

$$\sigma(\gamma)=\bar{\sigma}_{во}\cdot\left[1+\exp\left[n\cdot|\gamma|-(2.4\cdot n+1)\right]\right].$$

$$\gamma=\arccos\left[\frac{1}{2RR_1}\left(R_1^2+R^2-B^2\right)\right], \qquad (4)$$

где R – расстояние от источника подсвета до ВО, R_1 – расстояние от приемника до ВО, B – база между

приемником и источником подсвета, γ – бистатический угол разноса между приемником и источником подсвета относительно ВО.

Блок формирования области потребной информации о воздушных объектах. Область потребной информации (анализа) представляется в виде дискретного множества – трехмерной координатной матрицы ССС, содержащей $L = n \times m \times k$ элементов (n – по оси X, m – по оси Y, k – по оси Z).

Прямые и отраженные от воздушных объектов сигналы поступают на фоне аддитивных помех, задаваемых спектральными плотностями мощности $N_{пр}$ и $N_{отр}$ соответственно. Сигнал от источника подсвета поступает в канал прямого сигнала, сигнал от воздушного объекта – в канал отраженного сигнала, где осуществляется оптимальная по критерию Неймана-Пирсона обработка. Каждый из каналов характеризуется вектором параметров $\xi_4 = \left\{G_{ПП_{пр}}, T_{эфф}\right\}^T, \xi_5 = \left\{G_{ПП_{отр}}, \Delta f_{ПП}, T_{эфф}\right\}^T$, где $\Delta f_{ПП} \geq 1{,}3\Delta f_{ип}$ – полоса частот приемника; $G_{ППотр}$ – коэффициент усиления антенны канала прямого сигнала; $G_{ППпр}$ – коэффициент усиления антенны канала отраженного сигнала; $T_{эфф}$ – эффективная температура приемника.

В блоке расчета параметра и вероятности правильного обнаружения источника подсвета рассчитывается параметр обнаружения $q_{ип}^2$:

$$q_{ип}^2 = \frac{P_{ип} G_{ип} G_{бл\,ип} G_{ПП_{пр}} \lambda^2 \tau_и \eta_1 \eta_2 \eta_3 \left|\rho\right|^2}{\left(4\pi\right)^2 k T_{эфф} B^2}, \tag{5}$$

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; B – базовое расстояние от источника подсвета до приемного пункта; k – постоянная Больцмана; $\left|\rho\right|^2$ – коэффициент потерь в отношении сигнал-шум из-за неопределенности параметров зондирующего сигнала.

Соответствующее q значение вероятности правильного обнаружения D в j-приемном пункте при заданном значении вероятности ложной тревоги определяется как [7]

$$D_j = F_{лтj}^{1/\left(1+0.5q^2\right)}. \tag{6}$$

для сигнала со случайной амплитудой, распределенной по закону Рэлея, и со случайной начальной фазой, распределенной по равномерному закону.

Блок расчета параметра и вероятности правильного обнаружения воздушного объекта. Выражение для расчета параметра обнаружения $q_{во}^2$ [7]:

$$q_{во}^2 = \frac{P_{ип} G_{ип} G_{ПП_{отр}} \lambda^2 \sigma(\gamma) \eta_4 \tau_и \left|\rho\right|^2}{\left(4\pi\right)^3 k T_{эфф} R_1^2 R^2}, \tag{7}$$

где R_1 – расстояние от приемника до ВО; R – расстояние от некооперируемого источника подсвета до ВО.

Соответствующее $q_{во}$ значение вероятности правильного обнаружения D в j-приемном пункте при заданном значении вероятности ложной тревоги определяется выражением (6).

Модель пункта управления и обработки информации определяет порядок совместного функционирования приемных пунктов.

В блоке выбора количества приемников определяется количество N одновременно функционирующих приемников прямых и отраженных сигналов.

В блоке пересчета координат приемников определяются координаты приемников относительно центрального пункта управления и обработки информации, расположенного в начале координат декартовой системы.

Блок задания решающих правил устанавливает порядок совместного обнаружения источника подсвета и воздушного объекта. Если решение об обнаружении принимается в соответствии с наиболее «жестким» решающим правилом, «n из n» – при обнаружении источника подсвета в каждом из N приемников, а вероятности $F_{лтj}$ в них одинаковы, то вероятность правильного обнаружения источника подсвета системой определяется [7]

$$D_N = \prod_{j=1}^{N} D_j^N. \tag{8}$$

Решение об обнаружении воздушного объекта может приниматься в соответствии с «мягким» решающим правилом, «m из n»

$$D_N = 1 - \prod_{j=1}^{N}\left(1 - D_j\right). \tag{9}$$

Блок выбора метода измерения координат источника подсвета. В зависимости от заданного количества приемников в соответствующем блоке осуществляется выбор метода измерения координат источника подсвета: N=1 – однопозиционный доплеровский метод, N=2(3) – угломерный (триангуляционный), $N \geq 4$ – гиперболический (разностно-дальномерный) метод.

В блоке оценки точности измерения координат источника подсвета формируется дисперсионная матрица ошибок определения координат ИП D_α с элементами $\sigma_{\alpha k}^2$ [8]:

$$D_\alpha = Q D_\lambda Q^T, \tag{10}$$

где Q – матрица Якоби производных с элементами $\partial f\left(\tilde{\lambda}_i\right) / \partial \lambda_j$, $\lambda_m(t) = [\lambda_1(t), ..., \lambda_m(t)]^T$ – вектор первичных координат ИП, m=1...M, M – количество первичных измерений, $\sigma_{\alpha k}$ – СКО ошибок измерения вторичных координат, D_λ – дисперсионная матрица ошибок первичных измерений координат объекта элементами которой в зависимости от метода измерения координат являются $\left\{\sigma_{\Delta R}^2, \sigma_b^2, \sigma_\varepsilon^2, \sigma_\beta^2, \sigma_f^2, \sigma_\varphi^2, \sigma_{\Delta t}^2\right\}^T$, где $\sigma_{\Delta R}^2$ – дисперсия ошибки измерения разности хода (гиперболический метод

измерения координат), σ_b^2 – дисперсия ошибки измерения базы, $\sigma_\varepsilon^2, \sigma_\beta^2$ – дисперсии ошибок измерения угла места и азимута (угломерный); $\sigma_f^2, \sigma_\varphi^2, \sigma_{\Delta t}^2$ – дисперсии ошибок измерения частоты, угла и периода (однопозиционный доплеровский).

В блоке выбора метода измерения координат воздушного объекта в зависимости от заданного количества приемников осуществляется выбор при $N<3$ – суммарно-дальномерно-пеленгационный метод, а при $N\geq3$ – эллиптический способ.

Блок оценки точности измерения координат воздушного объекта. Оценка точности измерения координат воздушного объекта проводится согласно выражению (10). Дисперсионная матрица ошибок первичных измерений содержит элементы $\left\{\sigma_L^2, \sigma_{R_{ип}}^2, \sigma_\beta^2, \sigma_\varepsilon^2, \sigma_{\beta_{ип}}^2, \sigma_{\varepsilon_{ип}}^2\right\}^T$, где σ^2_L – дисперсия ошибки измерения разности хода, $\sigma_{Rип}$ – дисперсия ошибки измерения дальности от источника подсвета до приемного пункта; σ^2_ε, σ^2_β – дисперсии ошибок измерения угла места и азимута ВО; $\sigma^2_{\varepsilon ип}$, $\sigma^2_{\beta ип}$ – дисперсии ошибок измерения угла места и азимута ИП.

В блоке сравнения обобщенного пространственного и точностного показателя эффективности проводится оценка соответствия показателей качества и точности характеристик радиолокационной информации требованиям потребителей $\left\{D(R,\beta,\varepsilon)\geq D_{тр}; \sigma_{R_{во},\beta,\varepsilon}\leq\sigma_{доп}\right\}$.

В блоке выбора варианта пространственной структуры системы осуществляется расчет координат положения приемных пунктов, обеспечивающих наилучшие условия обнаружения и измерения координат воздушных объектов по сигналам некооперируемого источника подсвета в границах зоны потребной информации

$$F\left(X_П, Y_П, Z_П\right) = \{S_{\Omega_{рз}} \left| z = const, \overline{S}_{\Omega_{рз}} \right| z = const\}. \qquad (11)$$

В качестве целевой функции предлагается использовать площадь рабочей зоны $S_{\Omega_{рз}}$. Под рабочей зоной понимается область пространства, которая является пересечением зон обнаружения и местоопределения $\Omega_{зо}$ и $\Omega_{зм}$, рассчитываемая в соответствии с [9, 10].

В качестве критерия оптимизации при статичном положении источника подсвета используется максимум площади рабочей зоны

$$S_{\Omega_{рз}} = \max \qquad (12)$$

при заданных ограничениях:

1. Расстояние между приемными пунктами должно быть не менее $b_{\min}$ и не более $b_{\max}$ (определяемого, например, дальностью прямой видимости) базового значения:

$$b_{\min} \leq b_{ij} \leq b_{\max};$$
$$b_{ij} = \sqrt{\left(X_{Пj} - X_{Пi}\right)^2 + \left(Y_{Пj} - Y_{Пi}\right)^2 + \left(Z_{Пj} - Z_{Пi}\right)^2}, \quad i, j = \overline{1,..N}, \qquad (13)$$

где b_{ij} – базовое расстояние между приемными пунктами в МП РЛС; i, j – номера приемных пунктов.

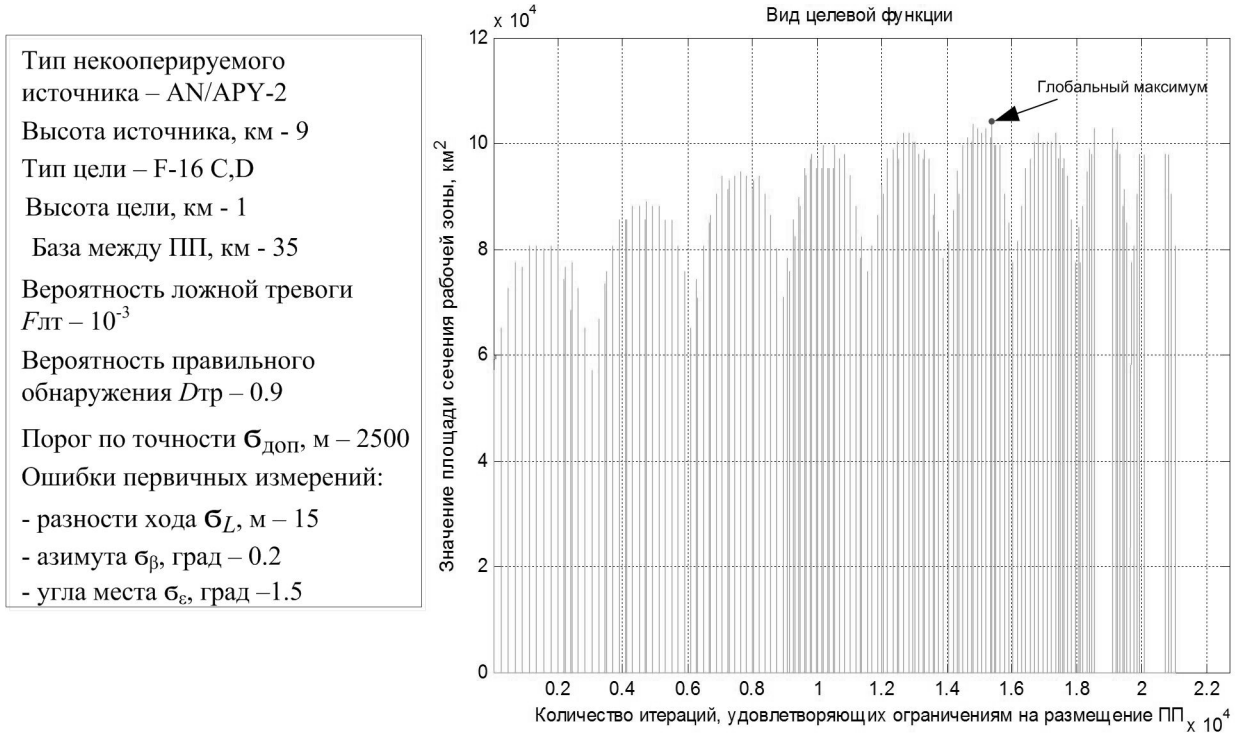

Рис. 3. Вид целевой функции

2. Область расположения приемных пунктов $R^{пп} \epsilon R^{а}$ отделена от области, в которой задана траектория движения источника подсвета $R^{ип} \epsilon R^{а}$ поверхностью, проходящей через кривую на плоскости *X, Y* (например, линию границы или рубежа боевого соприкосновения), причем область анализа является объединением областей $R^{а} = R^{пп} \cup R^{ип}$.

3. Требуемая вероятность обнаружения и допустимая точность измерения координат объекта задаются, исходя из требований, предъявляемых к системе

$$D_{тр} \in \{D_{min}; D_{max}\},$$
$$\sigma_{доп} \in \{0; \sigma_{max}\}, \qquad (14)$$

где $D_{тр}$ – требуемое значение вероятности правильного обнаружения объекта; $\sigma_{доп}$ – допустимое значение среднеквадратической ошибки определения местоположения объекта.

Для определения вида целевой функции воспользуемся криволинейным интегралом по замкнутому контуру, называемому циркуляцией

$$S_{\Omega_{рз}} = \frac{1}{2} \oint_{\Omega_{рз}|h_ц = const} (xdy - ydx), \qquad (15)$$

где $\Omega_{рз}|h_ц = \text{const}$ – граница сечения рабочей зоны плоскостью hц, обходимая против часовой стрелки.

Для поиска глобального условного экстремума целевой функции используется метод направленного перебора, как наиболее простой для реализации и гарантирующий, что будет найден наилучший результат. Выбор метода направленного перебора для решения задачи обусловлен сложным поведением целевой функции, которая имеет нелинейный характер. График целевой функции представлен на рис. 3.

При использовании метода направленного перебора определяется значение целевой функции для всех возможных вариантов размещения приемных пунктов в границах области анализа и выбирается наилучший в соответствии с критерием (12).

В случае оптимизации пространственной структуры МП РЛС с динамичным НИП, модель его движения задается согласно (2). Целевая функция для решаемой задачи принимает вид

$$\overline{S}_{\Omega_{рз}} = F\left(X_П, Y_П, Z_П\right). \qquad (16)$$

В качестве критерия оптимизации используется максимум среднего значения площади рабочей зоны

$$\overline{S}_{\Omega_{рз}} = \max, \qquad (17)$$

при ограничениях (13–15). Для определения среднего значения площади сечения рабочей зоны используется выражение

$$\overline{S}_{\Omega_{рз}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_{\Omega_{рз}}(t_i)}{n}, \qquad (18)$$

где $i = \overline{1,..n}$ – количество отсчетов времени по траектории ИП в интервале, $t \epsilon [t_1, T]$, T – интервал времени движения ИП по траектории.

На рис. 4 показан результат решения оптимизационной задачи для одного сечения рабочей зоны. Положение источника подсвета показано крестом, а приемных позиций – точками. При этом коэффициент увеличения площади рабочей зоны $K_{S_{\Omega_{рз}}}$ по сравнению с нерациональной структурой МП РЛС составляет от 7 до 18 %.

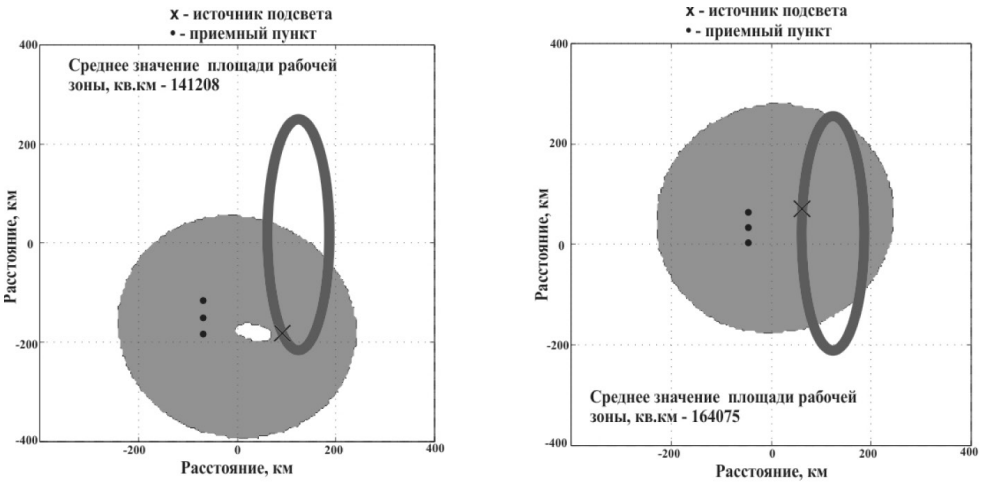

Рис. 4. Сечения рабочей зоны по воздушному объекту при нерациональном и рациональном расположении приемных пунктов

Рассчитанные координаты поступают в качестве рекомендаций на блок координатного обеспечения в приемники прямых и переотраженных сигналов.

Таким образом, разработанная модель МП РЛС с НИП обеспечивает определение наилучшего варианта построения системы, гарантирующего заданные значения показателей боевых возможностей.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации (НШ – 6831.2016.8).

Литература

1. Советов, Б. Я. Моделирование систем: учебник для академического бакалавриата / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – 7-е изд. – М.: Издательство Юрайт, 2015. – 343 с.

2. Конторов, Д. С. Введение в радиолокационную системотехнику / Д.С. Конторов, Ю.С. Голубев-Новожилов. – М.: Советское радио, 1971. – 368 с.

3. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов [и др.]. – М: Радио и связь, 1988. – 304 с.

4. Опыт и уроки боевого применения войск и вооружения ПВО в локальных войнах и вооруженных конфликтах / И.Р. Ашурбейли [и др]. – М.: Рекламно-издательская фирма ООО «Рекламный проспект», 2012. – 203 с.

5. Ашурков, И. С. Оптимизация пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы / И.С. Ашурков, Н.А. Лешко, В.В. Какаев // Информационно-управляющие системы. – 2015. – № 6 (79). – С. 81–85.

6 Аверьянов, В. Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы / В.Я. Аверьянов. – Минск: Наука и техника, 1978. – 184 с.

7. Черняк, В. С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.

8. Лешко, Н. А. Радиотехническая разведка и скрытная радиолокация / Н.А. Лешко, А.Н. Цыбульник. – Ярославль: Изд-во ЯГПУ им. К.Д. Ушинского, 2006. – 152 с.

9. Ашурков, И. С. Методика расчета рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы с посторонним источником подсвета / И.С. Ашурков, Н.А. Лешко, А.Н. Цыбульник // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2015. – Вып. 5–6. – С. 87 – 91.

10. Ульянов, Г. Н. Локальная система позиционирования объектов вооружения, военной техники и личного состава / Г.Н. Ульянов, И.Н. Павлов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2008. – № 1. – С. 33–39.