

Имитационная модель обработки радиолокационной информации в сети радиолокационных станций в условиях сигналоподобных помех

А. В. Паршуткин^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0001-7535-4880

Д. В. Левин^а, канд. техн. наук, преподаватель, [orcid.org/0000-0002-3480-087X, dm.181@yandex.ru](mailto:dm.181@yandex.ru)

А. В. Галандзовский^а, канд. техн. наук, старший преподаватель, orcid.org/0000-0002-2648-458X

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Ждановская наб., 13, Санкт-Петербург, 197198, РФ

Постановка проблемы: радиолокационные станции при слежении за целями в сложной помеховой обстановке формируют не только отметки целей, но и ложные отметки. Хорошо развитая теория и техника обеспечения помехоустойчивости оказываются малоприменимыми в условиях сигналоподобных помех, образованных в результате переотражений, многолучевого распространения или ретрансляции зондирующих сигналов. Повышение достоверности обработки радиолокационной информации в условиях сигналоподобных помех может быть достигнуто путем совместной обработки данных нескольких разнесенных постов в сети радиолокационных станций. **Цель:** разработка имитационной модели, позволяющей оценивать результативность селекции целей по пространственному разнесу ее измеренных положений при совместной обработке радиолокационной информации, получаемой от двух разнесенных радиолокационных станций. **Результаты:** реализован принцип совместной обработки радиолокационной информации для селекции целей в сети радиолокационных станций в условиях сигналоподобных помех, основанный на использовании информации о совпадении измеренных разнесенными радиолокационными станциями координат целей. Разработана имитационная модель для оценивания вероятности селекции целей в условиях сигналоподобных помех при совместной обработке радиолокационной информации от двух радиолокационных станций за счет анализа совпадения измеренных ими координат целей. Получены зависимости вероятности селекции целей от мощности шумовых помех и средней плотности ложных отметок в каналах дальности двух разнесенных радиолокационных станций. **Практическая значимость:** результаты имитационного моделирования демонстрируют возможность повышения дальности обнаружения целей сетью радиолокационных станций в условиях сигналоподобных помех при использовании информации о совпадении измеренных разнесенными радиолокационными станциями координат целей по сравнению с ситуацией применения только сигнальных признаков селекции целей на фоне ложных отметок.

Ключевые слова – радиолокационная станция, сигналоподобные помехи, селекция целей, ложные отметки.

Для цитирования: Паршуткин А. В., Левин Д. В., Галандзовский А. В. Имитационная модель обработки радиолокационной информации в сети радиолокационных станций в условиях сигналоподобных помех. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 6, с. 22–31. doi:10.31799/1684-8853-2019-6-22-31

For citation: Parshutkin A. V., Levin D. V., Galandzovskiy A. V. Simulation model of radar data processing in a station network under signal-like interference. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 22–31 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-22-31

Введение

В настоящее время основными информационными средствами в наземных системах обзора пространства являются радиолокационные станции (РЛС). Информация о местоположении и параметрах движения радиолокационных целей (РЛЦ) получается путем облучения и приема отраженных от них зондирующих сигналов. В реальных условиях применения РЛС слежение за множеством целей реализуется в условиях наличия естественных шумов и воздействия различных источников помех. При увеличении плотности ложных отметок (ЛЮ) алгоритмы обработки радиолокационной информации (РЛИ) имеют тенденцию к завязке ложных траекторий [1–4].

В современных РЛС обзора пространства для борьбы с помехами реализуется комплекс мер обеспечения помехозащиты. Основным направ-

лением борьбы с шумовыми помехами является повышение отношения сигнал/шум (ОСШ) на выходе схем накопителей радиолокационных сигналов в приемном тракте РЛС. Для этого увеличивают энергию излучаемых зондирующих сигналов и расширяют интервалы накапливаемых отраженных радиолокационных сигналов, а также применяют методы селекции сигналов на фоне помех, пространственной и спектральной режекции мешающих излучений [4–7]. Сложность защиты от сигналоподобных помех связана с тем, что изменение энергии зондирующего сигнала, его структуры и параметров не позволяет уменьшить воздействие таких помех. Методы селекции сигналов, режекции и компенсации помех при этом также не обеспечивают полное устранение ложных обнаружений [5–8].

Для ослабления воздействия помех может применяться совместная обработка РЛИ от не-

скольких разнесенных РЛС. Такой подход позволяет обеспечить рост достоверности обнаружения целей и повышение помехоустойчивости радиолокационной системы в целом за счет многокурсового наблюдения целей и различного характера воздействия помех на разнесенные РЛС [6, 7]. Поэтому исследования в области совершенствования методов совместной обработки РЛИ в сети РЛС в условиях сигналоподобных помех являются актуальными.

Рассмотренная в статье имитационная модель обработки РЛИ от двух разнесенных РЛС позволяет оценить вероятность селекции целей в области пространства с высокой плотностью ЛО, обусловленных наличием сигналоподобных помех. В основе разработки имитационной модели заложена возможность проведения многократных статистических испытаний измерения координат целей, наблюдаемых парой разнесенных РЛС, с учетом потенциальных точностей измерений каждой РЛС векторов положения и скорости целей, а также совместной обработки синхронизированных единичных результатов измерений, приведенных в единую систему координат.

Принцип совместной обработки РЛИ в сети РЛС для селекции целей в условиях сигналоподобных помех

Рассмотрим ситуацию, в которой цель, движущаяся по некоторой траектории, одновременно наблюдается несколькими разнесенными РЛС, объединенными в единую информационную сеть. Такая радиолокационная система подразумевает наличие центра обработки РЛИ и линий связи с каждой отдельной РЛС. Для обеспечения совместной когерентной обработки сигналов и помех каналы связи радиолокационной системы должны позволять передавать потоки данных описания широкополосных отраженных сигналов большого объема [3, 6, 7], что затрудняет техническую реализацию данного подхода к совместной обработке РЛИ от нескольких РЛС. Другим подходом к совместной обработке РЛИ от нескольких РЛС, рассматриваемым в настоящей работе, является объединение только результатов одиночных радиолокационных измерений параметров положения и движения целей, для чего достаточно линий связи с малой пропускной способностью [3, 6, 7].

Пусть на вход приемного устройства каждой РЛС поступает смесь шумовых и сигналоподобных помех. При этом появляются сигналоподобные помехи в различных элементах разрешения РЛС. Результатом такого воздействия является отсутствие интерференционных наложений сигналоподобных помех и резкое увеличение коли-

чества ЛО в канале дальности РЛС, учитываемых при обработке РЛИ. Пусть территориальный и частотный разнос РЛС обеспечивает различие проявлений помех для различных РЛС. Наличие перекрытия зон обзора в сети РЛС позволяет реализовать совместную обработку РЛИ о РЛЦ, наблюдаемых с различных ракурсов. Оба фактора способствуют повышению достоверности селекции целей на фоне помех.

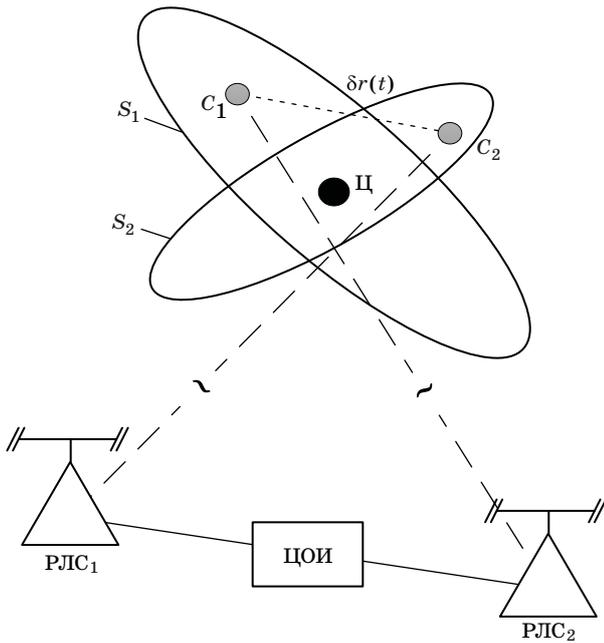
В результате радиолокационных измерений местоположения цели в каждой i -й РЛС формируется вектор состояния $\mathbf{R}_i = \langle R(t), \alpha(t), \beta(t), V_R(t), V_\alpha(t), V_\beta(t) \rangle$, где $R(t), \alpha(t), \beta(t)$ — наклонная дальность от РЛС до цели, угол азимута и угол места в топоцентрической системе координат РЛС; $V_R(t), V_\alpha(t), V_\beta(t)$ — составляющие вектора скорости по каждой координате.

В процессе радиолокационного наблюдения за движущимися целями возникает эффект Доплера, отражающий изменение в динамике составляющих вектора скорости. Поскольку при наблюдении целей в условиях сигналоподобных помех истинная цель и ЛО имеют соразмерные скорости, то наиболее информативной для селекции будет являться координатная информация о местоположении всех наблюдаемых целей [2–4].

Возможность объединения информации о целях в сети РЛС позволяет увеличить количество признаков их селекции на фоне помех, в частности за счет многокурсового наблюдения целей [3, 6, 7, 9–13]. По результатам выполненных радиолокационных измерений местоположения целей совместная обработка информации проводится в ЦОИ — центре обработки информации, находящемся или в одной из задействованных РЛС, или в вынесенной точке. При этом на первом этапе совместной обработки РЛИ выполняются операции группирования и отождествления отметок, полученных разнесенными РЛС. Группируются те отметки, которые находятся в соизмеримых областях пространства с размерами области неопределенности одиночных измерений РЛС, обусловленных собственными шумами и внешними помехами.

При группировании отметок с координатами, измеренными относительно точек стояния РЛС, после пересчета в единую систему координат появляется возможность сравнения измеренных координат целей по величине $\delta r(t)$, характеризующей разнос между измерениями, отнесенными к одной цели, т. е. расстояние между C_1 и C_2 (рис. 1). Оценка параметра $\delta r(t)$ может использоваться в качестве признака селекции целей на фоне ЛО [3, 6, 7].

Точками C_1 и C_2 на рис. 1 показаны измеренные РЛС₁ и РЛС₂ положения цели, находящейся в точке \mathcal{C} . Области пространства S_1 и S_2 — обла-



■ **Рис. 1.** Оценка положения цели, наблюдаемой парой разнесенных РЛС
 ■ **Fig. 1.** Assessment of radar target position observed by two spaced radar stations

сти возможных измеренных положений цели по результатам одиночных радиолокационных измерений для РЛС₁ и РЛС₂. Размеры областей S₁ и S₂ обусловлены собственными внутренними шумами РЛС и внешними аддитивными помехами.

Для вычисления расстояния $\delta r(t)$ рассмотрим порядок измерения местоположения целей и будем считать, что текущие значения наклонной дальности от РЛС до цели $R(t)$, а также углы азимута $\alpha(t)$ и углы места $\beta(t)$ определяются в соответствии со следующими выражениями [2, 3]:

$$\begin{aligned} R(t) &= R_{\text{ц}}(t) + \xi_R(t); \\ \alpha(t) &= \alpha_{\text{ц}}(t) + \xi_{\alpha}(t); \\ \beta(t) &= \beta_{\text{ц}}(t) + \xi_{\beta}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $R_{\text{ц}}(t)$, $\alpha_{\text{ц}}(t)$, $\beta_{\text{ц}}(t)$ — истинные значения наклонной дальности до цели и углы азимута и места; $\xi_R(t)$, $\xi_{\alpha}(t)$, $\xi_{\beta}(t)$ — ошибки измерений соответствующих координат. Также предполагается, что в каждой РЛС случайные ошибки измерений дальности $\xi_R(t)$, угла азимута $\xi_{\alpha}(t)$ и угла места $\xi_{\beta}(t)$ независимы между собой и распределены по нормальному закону с нулевыми средними и $(\sigma_R, \sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta})$ среднеквадратическими ошибками (СКО).

Для синхронизации измерений, выполняемых разнесенными РЛС, по результатам m измерений сферических координат целей $R(t)$, $\alpha(t)$ и $\beta(t)$, проводимых в пределах интервала време-

ни T_m , по методу наименьших квадратов формируются единичные измерения $(\tilde{R}, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta})$ [2, 3]. Момент времени t' , на который пересчитываются $(\tilde{R}, \tilde{\alpha}, \tilde{\beta})$, задается из условия $t' < T_m$.

После синхронизации измерений координаты целей, наблюдаемых каждой РЛС, для дальнейшей обработки преобразуются в единую систему координат (в геоцентрическую систему координат) по формуле

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{D}_{\text{РЛС}} \begin{bmatrix} \tilde{R} \cdot \sin(\tilde{\beta}) \cdot \cos(\tilde{\alpha}) \\ \tilde{R} \cdot \sin(\tilde{\beta}) \cdot \sin(\tilde{\alpha}) \\ \tilde{R} \cdot \cos(\tilde{\beta}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{РЛС}}, \quad (2)$$

где $\mathbf{D}_{\text{РЛС}}$ — матрица перевода в топоцентрическую систему координат РЛС; $(X, Y, Z)_{\text{РЛС}}$ — координаты местоположения РЛС в геоцентрической системе координат.

Значение величины δr определяется по формуле

$$\delta r = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}, \quad (3)$$

где (X_1, Y_1, Z_1) и (X_2, Y_2, Z_2) — приведенные к единому моменту времени координаты целей, измеренные РЛС₁ и РЛС₂ соответственно.

Значения $(\sigma_R, \sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta})$ определяются в соответствии с потенциальными точностями измерения одиночных параметров отраженных от цели сигналов, таких как запаздывание и частота [1–4, 7]. Точность измерения угловых координат во многом зависит от ошибок измерения направляющих косинусов и от направления пеленгования. У РЛС с фазированными антенными решетками точность измерения угловых координат убывает при смещении направления пеленгования от нормали к раскрытию. Это происходит из-за возрастания ошибки по углу при постоянной ошибке по направляющему косинусу, а также из-за снижения ОСШ [2, 8]. Потенциальные ошибки измерений траекторных параметров целей $(\sigma_R, \sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta})$ характеризуют предельно достижимую точность определения местоположения цели и зависят от ОСШ на выходе согласованного фильтра РЛС $(q_{\text{с/ш}})_{\text{вых}}$, ширины спектра зондирующего сигнала РЛС $\Delta f_{\text{с}}$, положения цели относительно нормали к раскрытию антенны РЛС ν и других.

Потенциальная ошибка измерения дальности σ_R определяется по формуле [4]

$$\sigma_R = \frac{c}{\Delta f_{\text{с}} \sqrt{(q_{\text{с/ш}})_{\text{вых}}}}, \quad (4)$$

где c — скорость света; $(q_{\text{с/ш}})_{\text{вых}}$ — ОСШ на выходе схем накопителей радиолокационных сигналов в приемном тракте РЛС:

$$(q_{\text{с/ш}})_{\text{вых}} = (P_{\text{с}} / P_{\text{п}})_{\text{вх}} \cdot B. \quad (5)$$

Здесь $(P_c / P_{\Pi})_{\text{вх}}$ — ОСШ по мощности в точке приема отраженного от цели зондирующего сигнала РЛС; B — база сигнала: $B = \Delta f_c \tau_{\text{и}}$, где $\tau_{\text{и}}$ — длительность импульса.

С учетом выражений (4) и (5) формула для расчета СКО измерения дальности σ_R принимает вид [4]

$$\sigma_R = \frac{c}{\sqrt{(P_c / P_{\Pi})_{\text{вх}} \cdot \Delta f_c^3 \tau_{\text{и}}}}. \quad (6)$$

Среднеквадратическая ошибка измерения угловых координат $\sigma_{\alpha, \beta}$ определяется по формуле

$$\sigma_{\alpha, \beta} = \frac{k_{\text{ДН}} \theta_{0,5}}{\sqrt{(q_{\text{с/ш}})_{\text{вых}}}}, \quad (7)$$

где $k_{\text{ДН}}$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от формы диаграммы направленности (ДН) антенны и способа измерения угловых координат (при измерении угловых координат методом парциальных диаграмм $k_{\text{ДН}} = 0,6 \dots 1$); $\theta_{0,5}$ — ширина приемной ДН РЛС по уровню половинной мощности в горизонтальной и угломестной плоскостях, град [4].

Для фазированной антенной решетки ширина приемной ДН по уровню половинной мощности определяется по формуле [8]

$$\theta_{0,5} = 2 \arcsin \left(\frac{0,45\lambda}{L_{x,y}} \right), \quad (8)$$

где λ — длина волны; $L_{x,y}$ — геометрические размеры антенны в горизонтальной (вертикальной) плоскости (длина, ширина).

При отклонении вектора положения цели от вектора нормали эффективный размер апертуры антенны фазированной антенной решетки, участвующей в приеме отраженного от цели зондирующего сигнала, определяется по формуле [1–3]

$$L_{\text{э } x,y} = L_{x,y} \cos(\nu). \quad (9)$$

При увеличении угла отклонения цели от нормали ν уменьшается эффективная площадь приема зондирующего сигнала. Поэтому чем больше эффективная поверхность антенны фазированной антенной решетки, тем меньше величина СКО на выходе оптимального фильтра. С учетом выражений (5), (7)–(9) формула расчета СКО угловых координат принимает вид

$$\sigma_{\alpha, \beta} = 2 \arcsin \left(\frac{0,45\lambda}{L_{x,y} \cdot \cos(\nu)} \right) \frac{k_{\text{ДН}}}{\sqrt{(P_c / P_{\Pi})_{\text{вх}} \cdot \Delta f_c^3 \tau_{\text{и}}}}. \quad (10)$$

Критерием принятия решения об истинности наблюдаемой цели является превышение величины $\delta r(t)$ над пороговым значением $\mu_{\text{обн}}$. Для заданных условий радиолокационного наблюдения

(т. е. с учетом положения цели относительно места стояния РЛС и раскрытия ее антенны, ОСШ на выходе приемного устройства РЛС и др.) значение порога селекции $\mu_{\text{обн}}$ задается на основе критерия Неймана — Пирсона [7, 8].

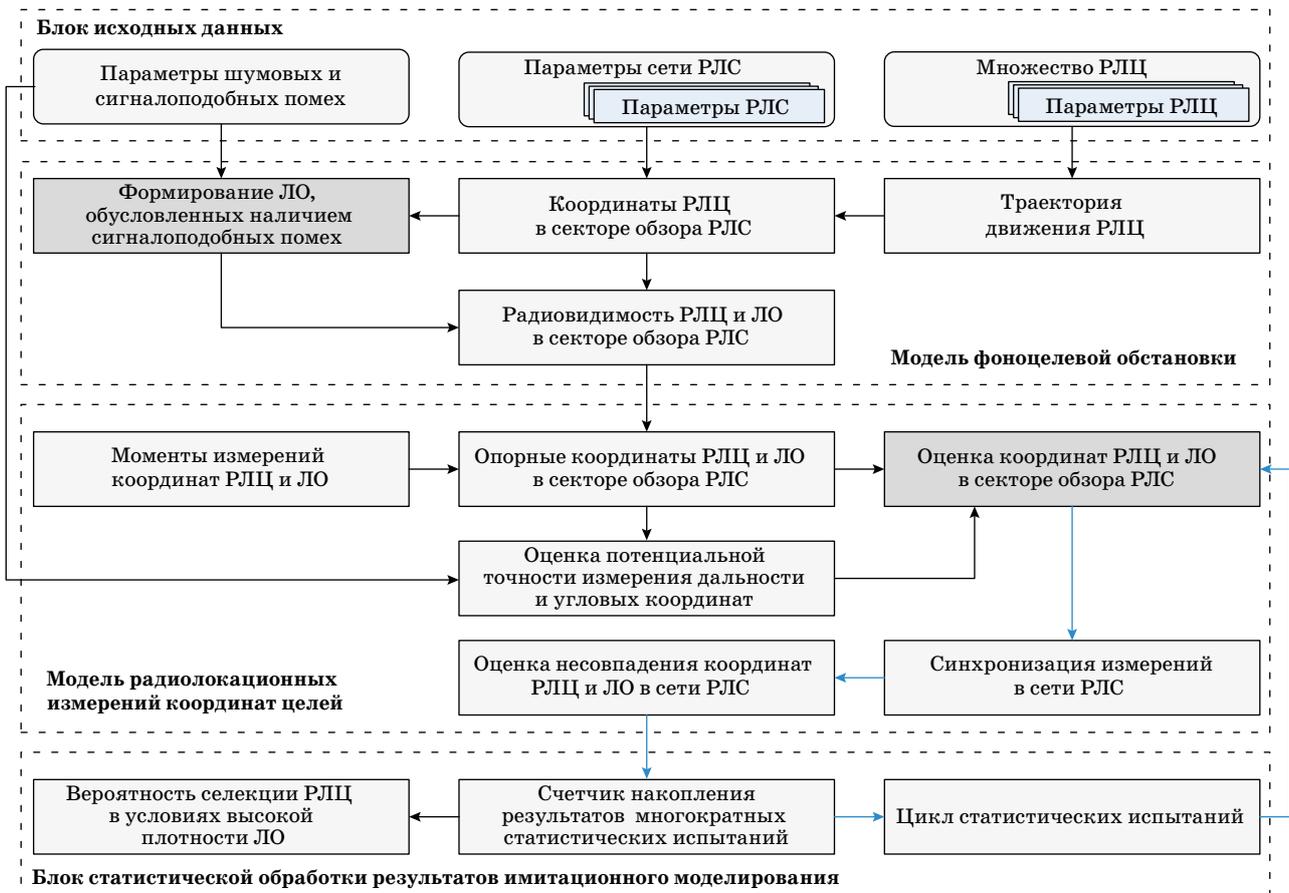
Структура имитационной модели оценивания пространственного положения РЛЦ в условиях сигналоподобных помех

Для оценивания возможностей РЛС обзора пространства по селекции целей в различных условиях радиоэлектронного наблюдения разработана имитационная модель (рис. 2).

В блоке *исходных данных* задаются пространственные, энергетические и сигнальные характеристики РЛС, РЛЦ, а также шумовых и сигналоподобных помех. Под пространственными характеристиками РЛС понимаются данные о месте размещения РЛС, размер и ориентация лоцируемой области пространства. Местоположение РЛС задается географическими координатами (широтой $\varphi_{\text{РЛС}}$ и долготой $\theta_{\text{РЛС}}$). Зона обзора РЛС определяется шириной сектора пространства в азимутальной и угломерной плоскостях. Ориентация сектора обзора пространства относительно северного направления задается углом поворота нормали к раскрытию антенны РЛС в азимутальной плоскости [1–3].

Под энергетическими параметрами РЛС понимаются данные о средней мощности излучения зондирующих сигналов P_c , коэффициент усиления приемной и передающей антенн РЛС. В качестве сигнальных характеристик РЛС используются данные о несущей частоте излучения f_c , ширине спектра зондирующих сигналов Δf_c , длительности импульсов $\tau_{\text{и}}$ и т. д. Пространственными параметрами РЛЦ являются координаты ее траектории полета и количество объектов $N_{\text{ц}}$, наблюдаемых РЛС в зоне обзора. Задаваемым параметром РЛЦ является среднее значение эффективной поверхности рассеяния $\sigma_{\text{ц}}$.

В модели *фоноцелевой обстановки* задаются траектории движения РЛЦ множеством прямоугольных координат в геоцентрической системе координат для рассматриваемого интервала времени. Затем отбираются координаты траектории полета РЛЦ, попадающие в зону обзора РЛС. Для этих координат по величине отношения мощности отраженного сигнала и суммарной мощности помех и внутренних шумов на выходе схем накопителей радиолокационных сигналов приемного тракта РЛС при заданной вероятности ложной тревоги выбираются те координаты, которые удовлетворяют условию радиовидимости целей в зоне обзора РЛС. Далее для РЛЦ, обнаруживаемых с требуемым качеством, и ЛЮ, обусловлен-



■ **Рис. 2.** Структура имитационной модели оценивания вероятности селекции целей в условиях сигналоподобных помех

■ **Fig. 2.** Structure of simulation model estimation of selection probability of radar targets under conditions of signal-like interference

ных наличием сигналоподобных помех, задаются их опорные координаты.

Учитывая режимы функционирования РЛС и параметры излучения зондирующих сигналов, в модели задаются моменты времени, на которые методом экстраполяции уточняются опорные координаты РЛЦ и ЛО [11–13]. На выходе модели фоноцелевой обстановки РЛЦ и ЛО представляются наборами координат в сферических системах координат всех участвующих в измерениях РЛС.

В модели радиолокационных измерений на основе данных о параметрах РЛС, положения целей в зоне обзора РЛС, условий радиолокационного наблюдения и параметров шумовых помех задаются оценки потенциальных точностей измерения сферических координат, т. е. СКО измерения дальности и угловых координат. Суммирование опорных дальностей и угловых координат целей со случайными реализациями ошибок измерений образуют оценки координат целей в секторе обзора РЛС. Для обеспечения совместной обработки результатов радиолокационных измерений

в сети РЛС все измерения синхронизируются путем пересчета измеренных координат целей, наблюдаемых разнесенными РЛС, на фиксированные моменты времени [11–16]. Далее проводится анализ совпадения измеренных координат целей в сети РЛС и сравнение величины несовпадения с пороговым значением.

После завершения одиночных измерений проводится изменение случайных ошибок измерений дальности и угловых координат наблюдаемых РЛЦ и ЛО. Для оценки статистических характеристик селекции целей в условиях сигналоподобных помех в модели реализован цикл многократных радиолокационных измерений. В блоке статистической обработки результатов имитационного моделирования определяется количество верно принятых решений об истинности целей, наблюдаемых сетью РЛС, и в графическом виде представляется зависимость изменения вероятности селекции целей на фоне ЛО от расстояния.

В основном шумовые помехи проявляются в виде мешающих сигналов, не коррелирован-

ных с зондирующими сигналами РЛС, и образуют в приемном тракте РЛС аддитивную смесь с напряжением принимаемого сигнала. Сигналоподобные помехи образуются, как правило, путем многократных переотражений зондирующих сигналов на неоднородностях рассеяния радиоволн в окружающей среде или в результате применения систем ретрансляции. При этом искажается фронт распространения радиоволны, а в точке приема возникает сложная интерференционная картина замираний, когда напряженность поля зависит от несущей частоты сигнала, времени и вектора координат точки приема [5, 17–20]. Поэтому задаваемыми параметрами шумовых помех являются средняя мощность их излучения P_{Π} и ширина спектра помехи Δf_{Π} . Сигналоподобные помехи в i -й РЛС описываются плотностью ρ_i размещения ЛО и общим количеством ЛО $N_{ЛО i}$.

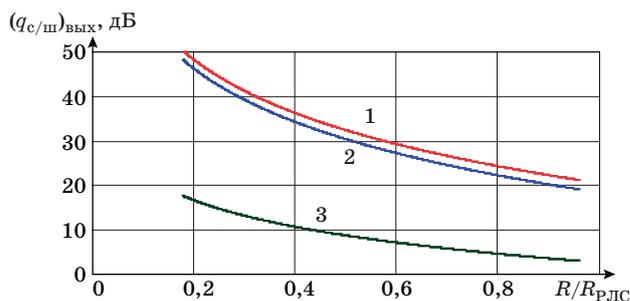
Для построения траектории движения целей на основе данных о траектории полета и данных о количестве ЛО $N_{ЛО i}$, обусловленных наличием сигналоподобных помех, рассчитывается трехмерный массив координат для i -й РЛС $(\tilde{X}_{i n}, \tilde{Y}_{i n}, \tilde{Z}_{i n})$, где $i = 1, 2, n \in [0, N]$, $N_i = N_{\Sigma} + N_{ЛО i}$.

При обнаружении целей в зоне обзора РЛС проводится оценивание отношения мощности полезного сигнала к аддитивной смеси внешних помех и внутренних шумов приемника $P_{\Sigma\Pi}$ и проверяется возможность обнаружения целей при использовании в РЛС оптимального к воздействию белого гауссова шума приемного устройства [5, 18, 19]. Применение такого подхода возможно при соблюдении условия обнаружения целей, т. е. в условиях неподавления РЛС шумовыми помехами. Значения отношения сигнал/помеха влияют на точность радиолокационных измерений, которые в имитационной модели учитываются именно как результаты измерений, т. е. как данные с выхода радиолокационного измерителя. Величина ОСШ учитывается при определении потенциальных ошибок измерений координат целей.

Имитационное моделирование измерения координат целей $(\tilde{X}_{i n}, \tilde{Y}_{i n}, \tilde{Z}_{i n})$ на фоне шумовых помех направлено на формирование нормально распределенных случайных ошибок измерений $(\xi_R, \xi_{\alpha}, \xi_{\beta})$, возникающих в угловых каналах и канале дальности РЛС, имеющих нулевое математическое ожидание и СКО $(\sigma_R, \sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta})$.

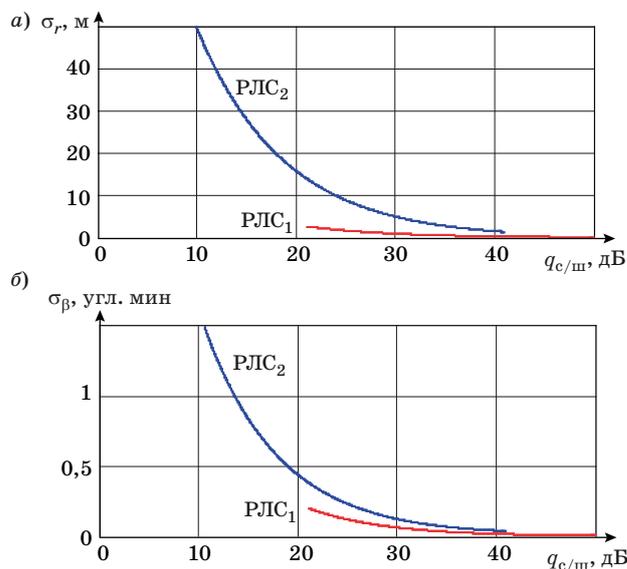
При увеличении интенсивности воздействия на РЛС шумовых помех для фиксируемого значения $R / R_{РЛС}$ происходит снижение ОСШ $(q_{с/ш})_{\text{вых}}$ по мощности на выходе приемного устройства (рис. 3).

В пределах одного цикла измерений для каждой РЛС вычисляется отношение мощности полезного сигнала к суммарной мощности помех



■ **Рис. 3.** Изменение ОСШ по мощности при функционировании РЛС на фоне внутренних тепловых шумов 1, при воздействии шумовых помех по боковым 2 и по основному 3 лепесткам приемной ДН РЛС

■ **Fig. 3.** Change signal/noise of power ratio during radar operation against the background of internal thermal noise 1 and under influence of noise interference on side 2 and main 3 lobes of receiving radar radiation pattern



■ **Рис. 4.** Изменение точности измерения дальности (а) и угловых координат цели (б) при штатном функционировании РЛС

■ **Fig. 4.** Changing accuracy of measuring range (a) and angular coordinates target (b) in normal operation radar station

$(q_{с/ш})_{\text{вых}}$ на выходе приемного устройства РЛС и уточняются оценки СКО измерения сферических координат, как это показано на рис. 4.

Величина δr при проведении многократных статистических испытаний рассчитывается в каждом отдельном цикле работы имитационной модели. Причем случайные ошибки измерений дальности и угловых координат изменяются для каждого статистического испытания в зависимости от СКО измерения координат $(\sigma_R, \sigma_{\alpha}, \sigma_{\beta})$, рассчитанных для данных условий радиолокационного наблюдения.

Результаты имитационного моделирования селекции по пространственному разнесу измеренных положений целей

Несмотря на протяженные зоны обзора современных сетей РЛС, трех и более кратное пересечение зон видимости отдельных станций встречается довольно редко. При наличии многократных пересечений зон обзора всегда могут быть выбраны одна или несколько наиболее информативных пар РЛС [6], поэтому в процессе имитационного моделирования рассматривается только пара разнесенных РЛС из состава сети.

Решение задачи селекции целей в условиях воздействия на РЛС сигналоподобных помех зависит от многих факторов. При моделировании были фиксированы такие характеристики, как взаимное положение двух разнесенных РЛС и ракурс наблюдения цели. Исследовалась зависимость результативности селекции целей от интенсивности воздействия шумовых помех, количества $N_{\text{ЛО } i}$ и средней плотности ЛО, обусловленных наличием сигналоподобных помех. Для оценивания вероятности селекции целей $P_{\text{сел}}$ в условиях сигналоподобных помех на основе совместной обработки результатов радиолокационных измерений двух разнесенных РЛС рассматривалась следующая ситуация.

В зоне совместного действия двух разнесенных РЛС находится одна РЛЦ. На каждую РЛС воздействуют шумовые маскирующие и сигналоподобные помехи. Шумовые маскирующие помехи создаются в диапазоне рабочих частот РЛС и воздействуют на приемные устройства РЛС как по основному, так и по боковым лепесткам ДН. Под моделью шумовой маскирующей помехи понимается ограниченный в пределах полосы пропускания приемника РЛС белый гауссов шум [5, 17, 20]. Воздействие на РЛС сигналоподобных помех приводит к образованию множества ЛО. Увеличение плотности ЛО приводит к завязке множества ложных траекторий [5, 9, 20]. Описание помех, образованных в результате многократной ретрансляции зондирующих сигналов РЛС, задавалось плотностью ЛО в наблюдаемой области пространства. При этом число ЛО соответствует количеству каналов ретрансляции. В зоне образования сигналоподобных помех ЛО формируются с равномерным законом распределения по дальности.

Оценивание вероятности селекции целей проводится путем многократных статистических испытаний. При этом использовались следующие допущения.

Во-первых, от испытания к испытанию измеренное положение РЛЦ изменяется исходя из того, что ошибки измерений в канале дальности и угловых каналах распределены по нормальному

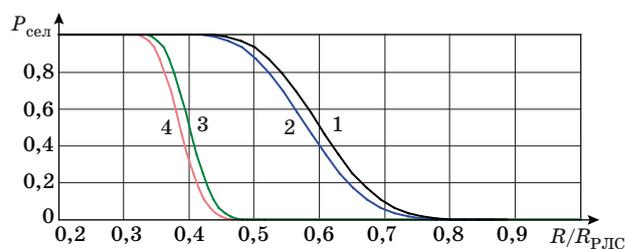
закону с нулевым математическим ожиданием и СКО, зависящей от величины отношения мощности принятого сигнала к суммарной мощности внутренних шумов и внешних шумовых помех $P_{\Sigma\text{п}}$ на выходе приемного устройства РЛС.

Во-вторых, ЛО распределены в пределах наблюдаемой области пространства по равномерному закону. В рамках одного цикла испытаний положение ЛО, обусловленных наличием сигналоподобных помех, остается неизменным или движется прямолинейно в случайном направлении.

В условиях шумовых помех $P_{\Sigma\text{п}}$, уровень которых на выходе согласованного фильтра РЛС значительно превышает по мощности уровень внутренних шумов приемника $P_{\text{ш}}$, дальность действия РЛС $R_{\text{РЛС}}$ обзора пространства снижается (рис. 5).

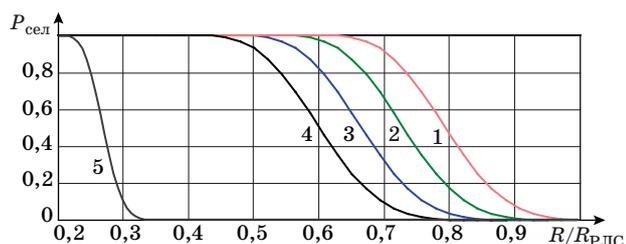
График 1 показывает изменение вероятности селекции цели со сниженной эффективной поверхностью рассеяния $\sigma_{\text{ц}}$ по сравнению с эффективной поверхностью рассеяния эталонного объекта наблюдения $\sigma_{\text{ц}}^*$. Паспортная дальность действия РЛС $R_{\text{РЛС}}$ задается при наблюдении цели с эффективной поверхностью рассеяния $\sigma_{\text{ц}}^*$ [1–4]. Воздействие шумовых помех по боковым лепесткам приемной ДН РЛС (линия 2) приводит к увеличению уровня фонового шума. Поэтому происходит незначительное снижение дальности селекции целей на фоне ЛО. В условиях воздействия шумовых помех по основному лепестку приемной ДН РЛС (линия 3) даже в условиях реализации методов защиты и компенсации помех происходит резкое снижение дальности действия РЛС. Изменение вероятности селекции целей в условиях шумовых маскирующих помех, воздействующих по основному и боковым лепесткам ДН, представлено графиком 4.

При совместном воздействии шумовых маскирующих и сигналоподобных помех задача селекции целей будет усложняться резким ухудшением фоноцелевой обстановки [10–12, 15, 16], т. е. количество целей, обнаруживаемых с требуемым качеством функционирования РЛС, будет значи-



■ **Рис. 5.** Изменение вероятности селекции целей на фоне ложных отметок при различных уровнях шумовых помех

■ **Fig. 5.** Changing probability of radar target selection against background of false marks at different noise levels



■ **Рис. 6.** Изменение вероятности селекции целей при различных плотностях ложных отметок и разных методах селекции сигналов на фоне помех

■ **Fig. 6.** Changing probability of radar target selection at different densities of false marks and different methods of signal selection on background of noise

тельно больше по сравнению с физически существующими объектами, находящимися в области пространства, наблюдаемой двумя РЛС.

На рис. 6 представлены графики изменения вероятности селекции целей на фоне ложных отметок для разных значений средней плотности ЛО. Под средней плотностью распределения ЛО в канале дальности РЛС понимается их среднее количество $N_{ЛО}$, размещаемое на единицу дальности, выраженную в некотором числе элементов разрешения i -й РЛС по дальности Δr_i , $i = 1, 2$ [3, 5, 7]. При моделировании предполагалось, что средняя плотность ЛО в первой и второй РЛС изменялась кратно величинам $\rho_{01} = \frac{1}{50\Delta r_1}$ и $\rho_{02} = \frac{1}{250\Delta r_2}$ для РЛС₁ и РЛС₂ соответственно.

График зависимости 1 получен при отсутствии ЛО, что соответствует наличию только шумовых маскирующих помех и $\rho_{1,2} = 0$. Графики 5 и 4 — для $\rho_{1,2} = \rho_{01,02}$, причем 5 соответствует реализации в каждой отдельной РЛС селекции по сигнальным признакам. Графики зависимостей 2, 3 и 4 получены при реализации селекции по

расстоянию между измеренными координатами для $\rho_{1,2} = \rho_{01,02} / 3$, $\rho_{1,2} = \rho_{01,02} / 2$ и $\rho_{1,2} = \rho_{01,02}$ соответственно. Результаты моделирования показали, что снижение средней плотности ЛО приводит к пропорциональному увеличению дальности обнаружения целей на фоне ЛО.

Таким образом, при воздействии шумовых маскирующих и сигналоподобных помех, существенно снижающих дальность уверенного обнаружения целей в РЛС, задача селекции целей может быть решена с требуемым качеством на больших расстояниях за счет анализа несовпадения измеренных координат целей и ЛО.

Заключение

Представлено описание имитационной модели совместной обработки РЛИ о целях, наблюдаемых парой разнесенных РЛС из сети РЛС, в условиях шумовых и сигналоподобных помех. Рассмотрены процессы сведения данных о результатах радиолокационных измерений разнесенных РЛС в единую систему координат с единой временной шкалой проводимых измерений, вычисление расстояния между измеренными координатами, отнесенными к одной цели, и последующая селекция целей по величине пространственного разнеса измеренных положений для разных РЛС.

Получены сравнительные оценки результативности селекции целей на фоне ЛО для различных условий наблюдения. Результаты имитационного моделирования демонстрируют возможность повышения дальности обнаружения целей в условиях высокой плотности ЛО по сравнению с ситуацией применения только сигнальных признаков селекции целей за счет использования информации о совпадении измеренных координат целей.

Литература

1. Антенны и радары с электронным управлением лучом / под ред. А. И. Синани и Г. В. Кауфмана. М., Радиотехника, 2016. 234 с.
2. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. М., Радиотехника, 2015. 440 с.
3. Skolnik M. I. *Radar handbook*. N. Y., McGraw-Hill, 2008. 1351 p.
4. Хансен Р. С. Фазированные антенные решетки. М., Техносфера, 2012. 566 с.
5. Куприянов А. И., Перунов Ю. М. *Радиоэлектронная борьба: радиотехническая разведка*. М., Вузовская книга, 2016. 190 с.
6. Черняк В. С. *Многопозиционная радиолокация*. М., Радио и связь, 1993. 416 с.

7. Кузьмин С. З. *Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации*. М., Сов. радио, 1974. 432 с.
8. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И. *Устройства СВЧ и антенны*. М., Радиотехника, 2016. 608 с.
9. Паршуткин А. В., Левин Д. В., Лоскутов А. И., Дунников А. С. Использование метода селекции целей при работе многопозиционных информационно-измерительных систем. *Изв. вузов. Приборостроение*, 2015, т. 58, № 7, с. 515–519.
10. Хомяков А. В., Филипченков В. И., Мамон Ю. И. Алгоритмы совместной траекторной обработки в многопозиционном радиолокационном комплексе. *Известия Тульского государственного университета: технические науки*, 2016, № 2, с. 305–314.

11. Лучков Н. В. Анализ объединения данных РЛС, их временная и пространственная привязка. *Автоматизированные системы управления*, 2015, № 1 (39), с. 21–26.
12. Сергунов К. Ю., Грицык П. А. Применение радиолокационных станций для решения задачи селекции сложных активных целей. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2015, № 3, с. 16–22.
13. Сергунов К. Ю. Применение пространственно-разнесенных радиолокационных станций для решения задач селекции. *Вестник Концерна ПВО «Алмаз-Антей»*, 2015, № 1, с. 59–64.
14. Азука К. К., Столяров А. А. Моделирование функционирования РЛС дальнего обнаружения диапазона УКВ в условиях воздействия естественных пассивных помех, обусловленных влиянием ионосферы. *Фундаментальные исследования: технические науки*, 2016, № 6, ч. 1, с. 9–13.
15. Chenguang S., Jianjiang Z., Fei W. Adaptive resource management algorithm for target tracking in radar network based on low probability of intercept. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2018, vol. 29, no. 4, pp. 1203–1226.
16. Jarez S., Fioranelli F., Ritchie M., Griffiths H. Multistatic radar classification of armed vs unarmed personnel using neural networks. *Evolving Systems*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 135–144.
17. Великанова Е. П., Рогожников Е. В., Ворошилин Е. П. Обзор методов борьбы с пассивными помехами в радиолокационных системах. *Изв. МГТУ «МАМИ»: естественные науки*, 2014, т. 4, № 3 (21), с. 29–37.
18. Акиншин Н. С., Быстров Р. П., Меньшиков В. Л., Потапов А. А. Особенности и методы повышения помехозащищенности радиоэлектронных средств. *Успехи современной радиоэлектроники*, 2018, № 2, с. 3–21.
19. Лихачев В. П., Семенов В. В., Веселков А. А. Показатель помехоустойчивости РЛС с синтезированной апертурой антенны к параметрически формируемым помехам, имитирующим точечные объекты. *Антенны*, 2017, № 12 (44), с. 31–37.
20. Бикенин Р. Р., Андрюков А. А. Подавление ответных (ретранслированных) помех при обработке псевдослучайных сигналов с относительной фазовой модуляцией. *Информация и космос*, 2016, № 2, с. 27–32.

UDC 621.396.965

doi:10.31799/1684-8853-2019-6-22-31

Simulation model of radar data processing in a station network under signal-like interference

A. V. Parshutkin^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-7535-4880

D. V. Levin^a, PhD, Tech., Lecturer, orcid.org/0000-0002-3480-087X, dm.181@yandex.ru

A. V. Galandzovskiy^a, PhD, Tech., Senior Lecturer, orcid.org/0000-0002-2648-458X

^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Radar stations, when tracking targets in a complex interference environment, form not only target marks but also false marks. A well-developed theory and technique of noise stability is not useful under signal-like interference caused by re-reflections, multi-path propagation or retransmission of the probing signals. The reliability of radar information processing under signal-like interference can be improved by joint processing of data from several spaced posts in a radar station network. **Purpose:** development of a simulation model which would allow you to estimate the effectiveness of radar target selection by spatial rating of its measured positions, with joint processing of the radar information obtained from two spaced radar stations. **Results:** We have implemented the framework of joint radar data processing for target selection in a radar station network under signal-like interference. The selection is based on using the information about the coincidence of radar target coordinates measured by spaced radar stations. A simulation model is developed to estimate the target selection probability under signal-like interference during the joint processing of data from two spaced radar stations, by analyzing the coincidence of the measured coordinates of the targets. It has been found out how the target selection probability depends on the noise interference power and the average density of false marks in the range channels of two spaced radar stations. **Practical relevance:** The simulation results demonstrate the possibility of increasing the range of radar target detection by network radar stations under signal-like interference, and the efficiency of using the information about coincidence of radar target coordinates measured by spaced radar stations, which is better than using only the signal features of radar target selection on the background of false marks.

Keywords — radar station, signal-like interference, radar target selection, false marks.

For citation: Parshutkin A. V., Levin D. V., Galandzovskiy A. V. Simulation model of radar data processing in a station network under signal-like interference. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 22–31 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2019-6-22-31

Reference

1. *Antenny i radary s elektronnyim upravleniem luchom* [Antenna systems with electronic beam control]. Eds. A. I. Sinani and G. V. Kaufman. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016. 234 p. (In Russian).
2. Bakulev P. A. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radiolocation systems]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. 440 p. (In Russian).
3. Skolnik M. I. *Radar handbook*. N. Y., McGraw-Hill, 2008. 1351 p.
4. Hansen R. S. *Fazirovannyye anteny reshetki* [Phased array antennas]. Moscow, Texnosfera Publ., 2012. 566 p. (In Russian).
5. Kupriyanov A. I., Perunov Yu. M. *Radioelektronnaya borba: radiotekhnicheskaya razvedka* [Radioelectronic warfare:

- radioelectronic intelligence]. Moscow, Vuzovskaya kniga Publ., 2016. 190 p. (In Russian).
6. Chernyak V. S. *Mnogopozitsionnaya radiolokaciya* [Multiposition radiolocation]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1993. 416 p. (In Russian).
 7. Kuzmin S. Z. *Osnovy teorii cifrovoy obrabotki radiolokatsionnoy informacii* [Theory fundamentals of digital processing of radar information]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974. 432 p. (In Russian).
 8. Voskresenskij D. I., Gostyxin V. L., Maksimov V. M., Ponomarev L. I. *Ustrojstva SVCh i anteny* [Microwave devices and antennas]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016. 608 p. (In Russian).
 9. Parshutkin A. V., Levin D. V., Loskutov A. I., Dunikov A. S. Application of a target selection method in operation of multiposition information and measuring system. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, vol. 58, no. 7, pp. 515–519 (In Russian).
 10. Khomyakov A. V., Filipchenkov V. I., Mamon Yu. I. Algorithms joint trajectory processing in multiposition radar complex. *Proc. of the TSU*, 2016, no. 2, pp. 305–314 (In Russian).
 11. Luchkov N. V. An analysis of radar data multiplexing, time and spatial bindings. *Automation of Control Processes*, 2015, no. 1 (39), pp. 21–26 (In Russian).
 12. Sergunov K. Yu., Gricik P. A. The use of radar for solving the problem of discrimination complex active decoys. *Journal Achievements of Modern Radioelectronics*, 2015, no. 3, pp. 16–22 (In Russian).
 13. Sergunov K. Yu. The use of space-spaced radar for solving the problem of selection. *Bulletin of Concern PVO «Almaz-Antey»*, 2015, no. 1, pp. 59–64 (In Russian).
 14. Azuka K. K., Stolyarov A. A. Modeling of functioning of long-range radar VHF under influence of natural clutter caused by the influence of the ionosphere. *Fundamental Research*, 2016, no. 6, ch. 1, pp. 9–13 (In Russian).
 15. Chenguang S., Jianjiang Z., Fei W. Adaptive resource management algorithm for target tracking in radar network based on low probability of intercept. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2018, vol. 29, no. 4, pp. 1203–1226.
 16. Jarez S., Fioranelli F., Ritchie M., Griffiths H. Multistatic radar classification of armed vs unarmed personnel using neural networks. *Evolving Systems*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 135–144.
 17. Velikanova E. P., Rogozhnikov E. V., Voroshilin E. P. Review of methods to combat clutter in radar systems. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2014, vol. 4, no. 3 (21), pp. 29–37 (In Russian).
 18. Akinshin N. S., Bystrov R. P., Menshikov V. L., Potapov A. A. Distinctive features and techniques of radio electronic means interference immunity enhancing. *Achievements of Modern Radioelectronics*, 2018, no. 2, pp. 3–21 (In Russian).
 19. Likhachev V. P., Semenov V. V., Veselkov A. A. Noise immunity index of synthetic aperture radar against parametric jamming which simulate point objects. *Antennas*, 2017, no. 12 (44), pp. 31–37 (In Russian).
 20. Bikkenin R. R., Andrukov A. A. Suppressing response (retranslated) interference in the course of processing pseudo-random signals with relative phase modulation. *Information and Space*, 2016, no. 2, pp. 27–32 (In Russian).