

ПРОБЛЕМЫ ЗАГОРИЗОНТНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ И ПУТИ ИХ ПРЕОДОЛЕНИЯ

Рассмотрены вопросы уточнения основных гипотез в областях геофизики, радиофизики и статистической физики, которые подлежат проверке и подтверждению при реализации процесса загоризонтного радиолокационного обнаружения, а также определения путей преодоления возникающих при таком обнаружении проблем.

E-mail: main@rl1-11.bmstu.ru

Ключевые слова: *загоризонтная радиолокационная станция, обнаружение целей, радиофизика, геофизика, ионосфера, пассивные помехи, короткие волны.*

Многолетний опыт разработки и эксплуатации отечественных и зарубежных загоризонтных (ЗГ) радиолокационных станций (РЛС) [1, 2] свидетельствует о том, что уровень развития прикладной радиофизики и геофизики, как правило, является недостаточным для обеспечения предельно достижимых характеристик при реализации процесса загоризонтного радиолокационного обнаружения (ЗГО) различных категорий целей. В этих условиях для замкнутого представления процесса ЗГО приходится принимать рабочие гипотезы на стыке трех физик: геофизики, радиофизики и статистической физики. Степень обоснованности этих гипотез определяет соответствующий риск Разработчика и Заказчика при выборе технических решений, которые обеспечивают выполнение тактико-технических характеристик (ТТХ), заданных в техническом задании (ТЗ) на опытно-конструкторскую работу (ОКР) [3].

Целями данной работы являются:

- уточнение основных гипотез, которые подлежат проверке и подтверждению;
- определение путей преодоления проблем ЗГО.

Установлено, что процесс ЗГО определяется, прежде всего, радиофизической картиной проникновения радиоволн за горизонт. При этом существуют реальные гелиогеофизические ситуации, изменяющие стандартную картину проникновения радиоволн за горизонт.

Схема формирования радиолокационных сигналов, используемых в ЗГ РЛС при отражении радиоволны от ионосферы в нормальных (невозмущенных) геофизических условиях приведена на рис. 1.

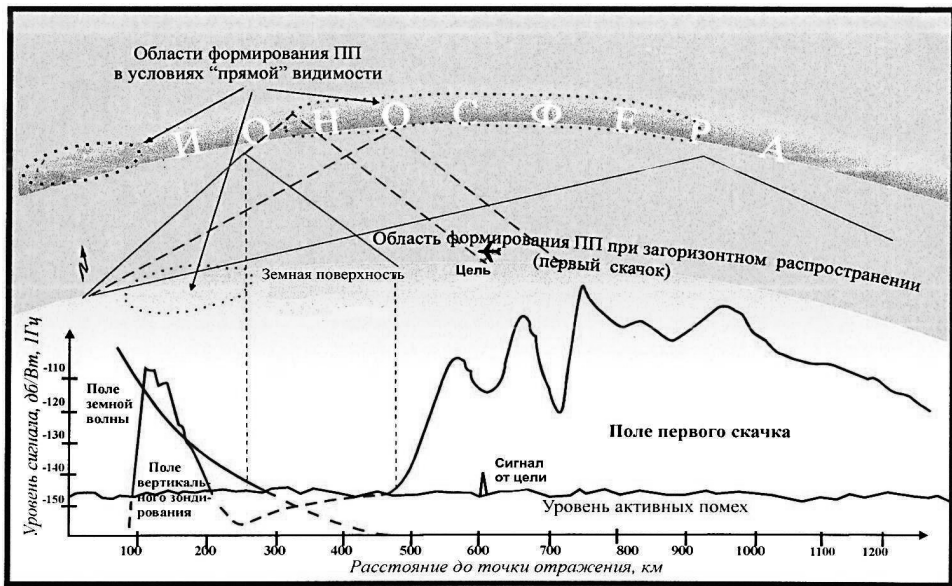


Рис. 1. Схема формирования радиолокационных сигналов в нормальных геофизических условиях

На рисунке выделено: земная поверхность, над которой летит воздушный объект (ВО), ионосфера, области формирования пассивных помех (ПП), траектории лучевых пакетов. В нижней части рисунка приведены условные уровни соответствующих радиолокационных сигналов и помех, присутствующих на входе приемного устройства в полосе зондирующего сигнала (ЗС).

Рассматриваемая схема формирования радиолокационных сигналов соответствует стандартному состоянию ионосферы со стандартной схемой геометрии траекторий загоризонтных волновых пакетов. Это отождествляется с нормальными геофизическими условиями (ГФУ), при которых ЗГ РЛС должна обеспечить выполнение предназначенных требований.

Предполагается, что при нормальных ГФУ существует диапазон частот, потеря энергии в котором не превышает значения, позволяющего конкретной ЗГ РЛС создавать напряженность электромагнитного поля, достаточную для обнаружения заданного класса целей. Этот диапазон называется диапазоном оптимальных рабочих частот (ДОРЧ). Обнаружение цели проводится на рабочей частоте, которая принадлежит ДОРЧ и имеет минимальный уровень активных помех.

Отсюда возникают следующие проблемы:

- необходимость прогнозирования состояния трасс локации в альтернативе «нормальна — аномальна», с которым отождествляется признак обнаружение / необнаружение цели;
- необходимость прогноза ширины диапазона ОРЧ ($\Delta F_{ОРЧ}$) и его положения на оси частот.

Преодоление этих проблем осуществляется путем разработки аппаратно-программных комплексов диагностики и краткосрочного прогнозирования ГФУ, прогнозирования ширины диапазона ОРЧ и его положения на частотной оси. Диагностика и прогнозирование проводятся на радиолокационных трассах, принадлежащих конструктивной зоне обзора ЗГ РЛС.

Традиционно в отечественных ЗГ РЛС эта задача решается с использованием сигналов возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ) ионосферы. При ВНЗ ионосферы на ряде частот в полосе свипирования получают дистанционно-частотную характеристику (ДЧХ) — зависимость дальности регистрации сигнала ВНЗ по лучу от частоты зондирования f . Для получения ДЧХ в секторе азимутальных углов меньше 20° достаточная полоса частотного свипирования

$$\Delta F_c = 0,2f_{ц},$$

где $f_{ц}$ — средняя частота полосы ΔF_c .

При ожидаемом значительном увеличении сектора азимутальных углов полоса $\Delta F_c \geq f_{ц}$. Излучение в такой полосе усложняет решение задач электромагнитной совместимости. Преодоление этой проблемы возможно при условии использования альтернативных источников данных о характеристиках ионосферы, каковыми являются сеть ионозондов вертикального и наклонного зондирования ионосферы и сеть средств GPS-мониторинга ионосферы АН РФ.

Пример суточных вариаций ДОРЧ в координатах частота—время показан на рис. 2.

Предполагается, что в диапазоне ОРЧ выполняется следующее условие: обнаружение целевой отметки возможно, если отношение сигнал/помеха $q(f_p)$ превышает некоторый заданный пороговый уровень q_0 , т. е.

$$q_{ц}(f_p) = P_3(f_p) + \sigma_{ц}(f_p) - W(f_p) - P_{п}(f_p) > q_0. \quad (1)$$

Здесь $P_3(f_p)$ — энергетический потенциал ЗГ РЛС; $\sigma_{ц}(f_p)$ — эффективная площадь рассеяния цели; $W(f_p)$ — радиолокационное затухание на трассе ЗГ РЛС—цель—ЗГ РЛС; $P_{п}(f_p)$ — суммарный уровень мощности помех.

При этом делается ряд предположений:

- реализованная величина $P_3(f_p)$ достаточна для обнаружения заданного класса целей;
- сигнал от цели узкополосный и стационарный;
- вид закона распределения амплитуд сигнала от цели сигналов помех описываются одинаковыми моделями. Влиянием многолучево-

сти и частотно-временной изменчивости радиоканала можно пренебречь;

- режим автоматической перестройки по частоте на временном интервале принятия решения не влияет на характеристики обнаружения.

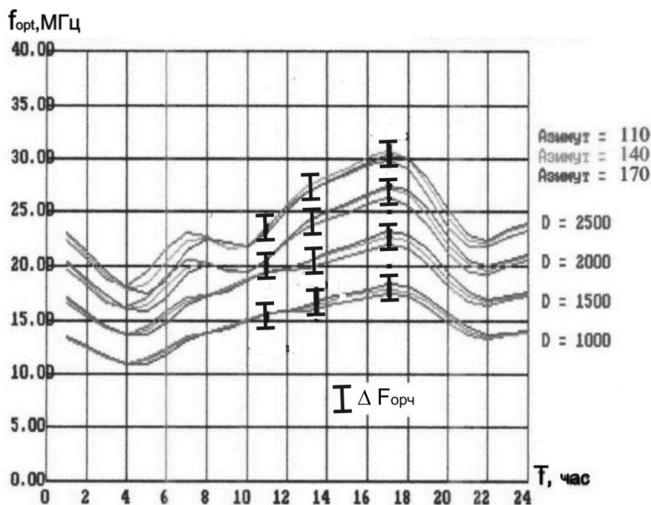


Рис. 2. Суточные вариации оптимальных рабочих частот (лето, высокая солнечная активность)

Суточные вариации рабочей частоты и эффективная площадь рассеяния (ЭПР) большой и малоразмерной воздушной цели представлены на рис. 3. На рисунке видно, что на используемых в ночное время частотах ЭПР малоразмерной цели меньше, чем ЭПР большой цели примерно на 30 дБ, что в соответствии с выражением (1) требует соответствующего увеличения энергетического потенциала $P_3(f_p)$. Реализация требуемого $P_3(f_p)$ не всегда возможна. Из литературы известно, что реализованная на ЗГ РЛС НААРР максимальная средняя мощность, подводимая к антенне, $\bar{P} \sim 4$ МВт, или $\bar{P} \sim 66$ дБ/Вт. При коэффициенте усиления передающей антенны $G \sim 23$ дБ и эффективной площади приемной антенны $S \sim 48$ дБ энергетический потенциал составляет $P_3(f_p) \approx 137$ дБ. Однако и этого значения $P_3(f_p)$ недостаточно для надежного обнаружения малоразмерной цели в низкочастотной области КВ диапазона.

Преодолеть эти проблемы возможно путем проведения экспериментально-теоретических работ по воздействию на ионосферу мощным излучением радиоволн КВ диапазона. При этом исследования должны быть направлены на изучение возможности и режимов работы нагревных стенов для создания локальных высокоионизированных областей ионосферы с целью создания дневной МПЧ в ночных

условиях. Это обеспечит работу ЗГ РЛС на частотах, на которых требуется практически реализуемый энергетический потенциал для обнаружения малоразмерной цели.

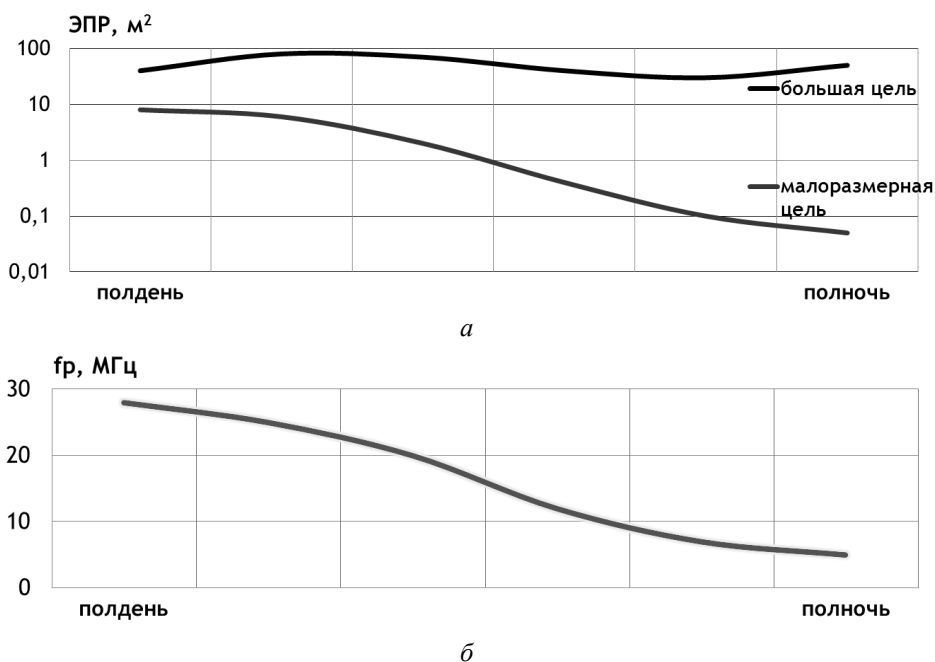


Рис. 3. Суточные вариации ЭПР (а) большой и малоразмерной воздушной цели и рабочей частоты (б)

Пример пространственного распределения парциальных участков в конструктивной зоне обзора, в которой выполняется условие (1), представлен на рис. 4.

Предполагается, что существует детерминированная связь между параметрами «сигнальной» трассы и параметрами движения точечного рассеивателя — цели, а также, что поток энергии в канале распространения и время нахождения цели в этом канале достаточны для автоматизации процесса обнаружения трасс целеподобных отметок.

Выполнение этих условий в нормальных ГФУ обеспечивает превышение вероятности правильного обнаружения заданного класса целей заданного порогового значения при заданной вероятности ложных тревог и заданном временном интервале $T_{обн}$, на максимальной площади в пределах конструктивной зоны ответственности ЗГ РЛС. Кроме этого обеспечивается измерение пространственных координат и элементов движения обнаруженных целей на заданном временном интервале $T_{изм}$.

Интервалы времени $T_{обн}$ и $T_{изм}$ определяют временной интервал принятия решения об обнаружении объекта.

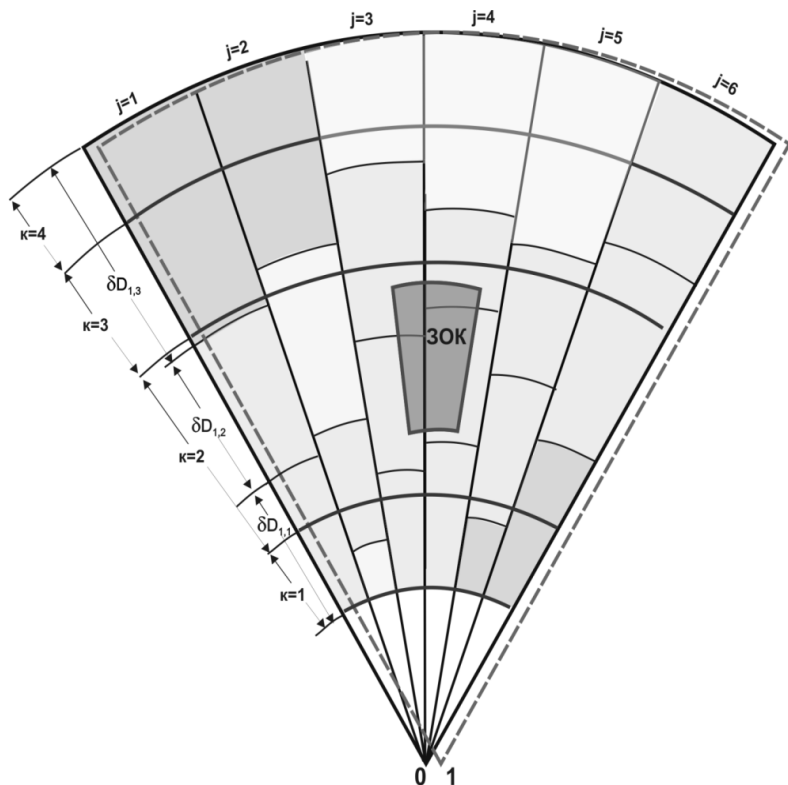


Рис. 4. Пример пространственного распределения частичных участков, перекрывающих конструктивную зону обзора:

l — передающая позиция; *0* — приемная позиция

Однако на практике процесс ЗГО характеризуется рядом особенностей, не отмеченных выше. Так, предположение о том, что сигнал от объекта обнаружения является узкополосным и стационарным, требует оценки потерь, связанных со свойствами реальных сигналов. Другое предположение о том, что и для амплитуд радиолокационного сигнала от объекта, и для амплитуд сигналов активных и пассивных помех принимаются одинаковые модели законов распределения в виде логнормального закона, требует оценки соответствующих потерь и разработки дополнительных правил принятия решения об обнаружении целеподобных отметок.

Важной особенностью обнаружения трасс является разрывы трасс и потеря однозначной связи между количеством трасс и количеством объектов обнаружения, возникающих под влиянием многолучевости и частотно-временной изменчивости радиоканала. В связи с этим возникает проблема минимизации этих потерь путем выбора ширины диапазона $\Delta F_{\text{орч}}$ и его положения на частотной оси по двум критериям:

- 1) минимум затухания на радиолокационной трассе;

2) минимум количества мод, участвующих в формировании сигнала цели.

Структура сигналов помех, принимаемых антенной с высоким коэффициентом направленного действия (КНД), отличается от структуры сигналов, принятых антенной с низким КНД, что может привести к дополнительным потерям и, следовательно, требует специального изучения.

Сосредоточенные по времени и дальности характеристики излучений молниевых разрядов и сигналов, отраженных от метеорных следов, влияют на законы распределения амплитуд помех, что требует разработки методов минимизации влияния этих помех на характеристики обнаружения ЗГ РЛС. Путь разрешения этой проблемы — изучение свойств помех и разработка алгоритмов пространственного и временного подавления помех.

В полосе ЗС мощность сигналов ПП на выходе приемного устройства ЗГ РЛС может превышать уровень сигнала от цели на 60 дБ и более. Доплеровская фильтрация должна обеспечить разрешение цели с доплеровским сдвигом 1...2 Гц. Для реализации этой процедуры необходим динамический диапазон обработки более 90 дБ, что обеспечивается «обкаткой» временной выборки перед процедурой доплеровской фильтрации. Это приводит к потере энергии сигнала. При работе с линейно-частотно-модулированным сигналом с базой ($\delta f_{ЗС} \tau_{ЗС}$) динамический диапазон обработки определяется выражением

$$D_{д.д} = 6,02m + 1,76 + 10 \lg(\delta f_{ЗС} \tau_{ЗС}), \quad (2)$$

где m — число разрядов аналого-цифрового преобразователя; $\delta f_{ЗС}$ — полоса ЗС; $\tau_{ЗС}$ — длительность огибающей ЗС.

Из выражения (2) следует, что для минимизации потерь глубина обкатки должна быть уменьшена путем: увеличения количества разрядов в аппаратуре аналого-цифрового преобразователя; увеличения длительности ЗС; расширения полосы ЗС.

Основной ограничитель при реализации этой процедуры — частотно-временная изменчивость радиоканала. Отсюда следует, что при разработке ЗГ РЛС главным приоритетом являются новации по развитию технологий учета ионосферных искажений с целью поддержания когерентности радиолокационного сигнала во времени, пространстве и в зависимости от полосы частот, занимаемой ЗС.

Как и любая надгоризонтная РЛС, ЗГ РЛС измеряет задержку обнаруженного сигнала τ_c , азимутальное направление, с которого приходит сигнал β_c и доплеровскую частоту сигнала $f_{д.с}$.

Переход от результатов измерения τ_c , β_c , $f_{д.с}$ к географическим координатам φ , λ , V осуществляется в логико-информационной последовательности:

$$(\tau_c, \beta_c, f_{д.с}) \rightarrow (D_{л}, \beta_{л}, V_{r.л}) \rightarrow (\varphi, \lambda, \mathbf{V}). \quad (3)$$

При этом переход от результатов измерения $\tau_c, \beta_c, f_{д.с}$ к локационным координатам $D_{л}, \beta_{л}, V_{r.л}$ обусловлен использованием нескольких поправочных коэффициентов. Предполагается, что текущие средние значения поправочных коэффициентов могут быть определены, а их флюктуационная составляющая обладает малыми вариациями относительно своих средних значений.

На рисунке 5, а в разрезе по вертикали изображена траектория распространения зондирующего сигнала ЗГ РЛС до участка земной поверхности, где находится цель. Передающее устройство излучает ЗС. Рабочая частота ЗС — f_p выбирается таким образом, чтобы «осветить» область пространства, где необходимо провести обнаружение цели. Подсистема обнаружения измеряет задержку сигнала τ_c , отраженного от объекта обнаружения, с погрешностью $\delta\tau_c$. При однопозиционной схеме ЗГ РЛС дальность до объекта обнаружения по лучу рассчитывается по формуле

$$P = 0,5c\tau_c,$$

где c — скорость света в вакууме, $c = 3 \cdot 10^8$ м.

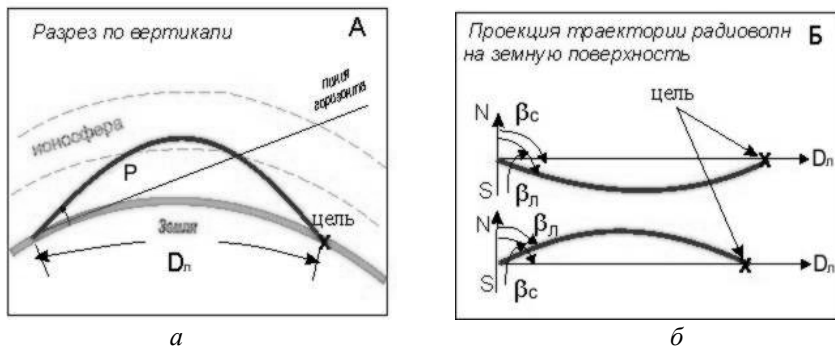


Рис. 5. Основные особенности процесса координатометрии при ЗГО:

а — разрез по вертикали; б — проекция траектории радиоволн на наземную поверхность

Погрешность δP оценки дальности по лучу P определяется погрешностью измерения τ_c , которая, в свою очередь, зависит от реализованных в ЗГ РЛС аппаратурно-программных решений.

Дальность от ЗГ РЛС до объекта обнаружения по Земле определяется выражением

$$D_{л} = \frac{P}{(K_{\tau})_{пр}},$$

где $(K_{\tau})_{\text{пр}}$ — первый поправочный коэффициент, обеспечивающий пересчет дальности по лучу к дальности по Земле, определяется с погрешностью $(\delta K_{\tau})_{\text{пр}}$.

Таким образом, определение дальности от ЗГ РЛС до объекта обнаружения осуществляется с погрешностью $\delta D_{\text{л}}$.

Здесь и далее предполагается независимость погрешностей отдельных составляющих, а погрешность оценки величины составляющих моделируется нормальным законом. Тогда можно принять, что дисперсия относительных погрешностей определения локационной дальности равна сумме дисперсий относительных погрешностей измерения $P_{\text{и}}$ погрешности прогноза K_{τ} , или в терминах СКО:

$$\text{СКО}_{\text{д.л}} = \sqrt{\text{СКО}_P^2 + \text{СКО}_K^2}. \quad (4)$$

На рисунке 5, б изображена проекция лучевой траектории радиоволны на земную поверхность при распространении зондирующего сигнала ЗГ РЛС от объекта обнаружения до ЗГ РЛС. Азимутальное направление на объект обнаружения на рис. 5, б обозначено прямой линией. Возможная траектория распространения радиоволны, рассеянной объектом (выпуклые кривые), азимутальное направление на объект обнаружения, измеряемое ЗГ РЛС — $\beta_{\text{с}}$. Загоризонтная РЛС измеряет $\beta_{\text{с}}$ с погрешностью $\delta\beta_{\text{с}}$, которая определяется аппаратурно-программными решениями, реализованными в ЗГ РЛС.

Азимутальное направление на объект рассчитывается по формуле

$$\beta_{\text{л}} = \beta_{\text{с}} \pm \beta_{\text{пр}},$$

где $\beta_{\text{пр}}$ — прогнозируемое значение девиации радиолокационного сигнала, определяемое с погрешностью $\delta(\beta)_{\text{пр}}$.

Тогда СКО определения азимутального направления на цель

$$\text{СКО}_{\beta_{\text{л}}} = \sqrt{\text{СКО}_{\beta_{\text{с}}}^2 + \text{СКО}_{\beta_{\text{пр}}}^2}. \quad (5)$$

Величины $\text{СКО}_{\text{д.л}}$ и $\text{СКО}_{\beta_{\text{л}}}$ определяют погрешность оценки локационных координат обнаруженного объекта. После перехода от дальности по лучу к дальности по земной поверхности происходит переход от локационных координат к географическим, который осуществляется по формулам сферической геометрии с учетом реальных зидий.

Элементы движения объекта характеризуются вектором скорости \mathbf{V} перемещения объекта вдоль земной поверхности. Скорость объекта \mathbf{V} определяется суммой радиальной V_r и тангенциальной V_t составляющих скорости.

Тангенциальная составляющая скорости V_t определяется величиной перемещения объекта по углу $\Delta\beta$ за время $\Delta t = t_2 - t_1$. Перемещение объекта по углу (угловой путь) определяется разностью между азимутом на объект β_2 в момент времени t_2 и азимутом на объект β_1 в момент времени t_1 :

$$V_t = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\Delta t} D, \quad (6)$$

где D — дальность до объекта по земле в момент измерения азимута.

Предполагается, что при перемещении объекта в пространстве за время Δt величина D , величина азимутальной девиации $(\delta\beta)_{\text{пр}}$ и величина $(K_\tau)_{\text{пр}}$ остаются постоянными.

После несложных преобразований получим выражения для оценки относительной вариации тангенциальной составляющей скорости обнаруженного объекта:

$$\frac{\overline{(\delta V_t)^2}}{V_t^2} = \frac{\overline{2(\delta\beta)^2}}{(\beta_2 - \beta_1)^2} + \frac{\overline{(\delta D)^2}}{D^2}. \quad (7)$$

Отсюда вытекает требование, чтобы $\beta_2 - \beta_1$ не было малым, т. е. чтобы интервал времени между измерениями азимута Δt обеспечивал перемещение объекта по азимуту при максимальной тангенциальной скорости объекта.

Радиальную составляющую скорости V_r можно определить по перемещению объекта по дальности за время $\Delta t = t_2 - t_1$:

$$V_r = \frac{D_2 - D_1}{\Delta t}. \quad (8)$$

Из этой формулы следует выражение для оценки относительных вариаций радиальной составляющей скорости:

$$\frac{\overline{(\delta V_{r,1})^2}}{V_{r,1}^2} = \frac{\overline{2(\delta D)^2}}{(D_2 - D_1)^2}. \quad (9)$$

Отсюда вытекает требование: $D_2 - D_1$ должно быть достаточным, чтобы за интервал времени между измерениями дальности Δt объект переместился из одного канала дальности в другой канал дальности.

Определение радиальной составляющей скорости V_r возможно также по доплеровскому смещению частоты радиолокационного сигнала — $f_{\text{д}}$. Величина доплеровского смещения частоты радиолокаци-

онного сигнала, обусловленная радиальной скоростью объекта обнаружения $f_{Д.ц}$, определяется по проекции вектора скорости объекта обнаружения \mathbf{V} на лучевую траекторию радиоволны. Предполагается, что воздействие цели на среду незначительно.

На доплеровскую частоту $f_{Д.ц}$ накладываются вариации доплеровской частоты, обусловленные горизонтальными градиентами и флюктуациями ионосферных параметров $\pm f_{Д.и}$. В результате измеряемая ЗГ РЛС частота доплеровского смещения радиолокационного сигнала $f'_Д$

$$f'_Д = f_{Д.ц} \pm f_{Д.и}. \quad (10)$$

Минимизация погрешности измерения величины $f_{Д.ц}$ возможна за счет компенсации величины $f_{Д.и}$. Предполагается, что компенсация величины $f_{Д.и}$ может быть осуществлена с учетом результатов измерения величины смещения доплеровской частоты сигнала ПП $f_{Д.ПП}$. Эти измерения проводятся в подсистеме обнаружения параллельно с измерениями $f'_Д$. Предполагается, что величины $f_{Д.и}$ и $f_{Д.ПП}$ обусловлены одинаковыми причинами, поскольку области, существенные для распространения радиоволн сигналов от объекта обнаружения и ПП, совпадают. Следовательно, $f_{Д.и} = f_{Д.ПП}$. Тогда радиальная скорость объекта обнаружения

$$V_{r2} = \frac{(f'_Д \pm f_{Д.ПП})\lambda}{2}, \quad (11)$$

где λ — длина излучаемой радиоволны. Погрешность определения V_{r2} обусловлена погрешностью измерения $f'_Д$ и погрешностями компенсации $f_{Д.и}$, т. е. погрешностью измерения доплеровской частоты сигналов ПП.

Следовательно, выражение для относительной погрешности измерения радиальной составляющей скорости объекта по доплеровскому смещению частоты определяется выражением

$$\frac{(\delta V_{r2})^2}{(V_{r2})^2} = \frac{\left[\delta (f'_Д \pm f_{Д.ПП}) \right]^2}{(f'_Д \pm f_{Д.ПП})^2}. \quad (12)$$

При наличии независимых оценок V_r , полученных первым методом (по задержке) и вторым методом (по доплеровской частоте), це-

лесообразно осуществить суммирование V_{r1} и V_{r2} . При суммировании необходимо, чтобы при $СКО_{r1} \gg СКО_{r2}$ была выбрана оценка V_{r2} , а при $СКО_{r1} \ll СКО_{r2}$ — оценка V_{r1} . Этим условиям удовлетворяет схема весового суммирования

$$V_r = \frac{(СКО_{r2})^2}{(СКО_{r1})^2 + (СКО_{r2})^2} V_{r1} + \frac{(СКО_{r1})^2}{(СКО_{r1})^2 + (СКО_{r2})^2} V_{r2}. \quad (13)$$

При $СКО_{r1} = СКО_{r2}$ справедливо соотношение

$$V_r = \frac{V_{r1} + V_{r2}}{2}. \quad (14)$$

Скорость обнаруженного объекта рассчитывается по формуле

$$V^2 = V_r^2 + V_t^2. \quad (15)$$

Относительная погрешность измерения скорости определяется выражением

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{V_r}{V} \delta V_r + \frac{V_t}{V} \delta V_t. \quad (16)$$

Из приведенных соотношений следует, что погрешности определения координат и элементов движения целей определяются реализованными в ЗГ РЛС аппаратурно-программными решениями и погрешностями прогнозирования коэффициентов K_τ и $\delta\beta$.

Минимизация погрешности прогнозирования коэффициентов K_τ и $\delta\beta$ является очередной проблемой ЗГО, решение которой обеспечивается разработкой и программной реализацией прогностической трехмерной модели регулярных слоев ионосферы, оперативно калибруемой гелиогеофизическими данными, поступающими от служб контроля ионосферы, магнитосферы, служб контроля активности Солнца с тактом порядка 1 ч, а также разработкой и программной реализацией модели расчета траекторий КВ-волновых пакетов на односкачковых трассах. Это позволит:

1) реализовать принцип оптимальной автономности отечественных ЗГ РЛС, включая использование:

- отечественной модели в качестве долгосрочного прогноза параметров регулярных слоев ионосферы,
- отечественной модели $N_e(h)$ -профиля (экспоненциально-параболической модели),
- гелиогеофизических данных, оперативно поступающих от отечественных служб контроля ионосферы, магнитосферы, служб контроля активности Солнца;

2) разработать стандартные оценки эффективности решения задач адаптации ЗГ РЛС к геофизическим условиям, включая определение характеристик устойчивости и точности расчета скачковых траекторий с целью оценки ДОРЧ, K_{τ} , $\delta\beta$;

3) разработать и программно реализовать алгоритм прогнозирования (на 1...3 ч) характеристик обнаружения заданного класса целей, включая разработку и программную реализацию алгоритма прогноза состояния трасс локации, в альтернативе «нормальна – аномальна».

Создание и лицензирование отечественных геофизических и радиофизических моделей обеспечит контролируемый уровень независимости отечественных радиотехнических систем от геофизической информации, поступающей из-за рубежа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хидрик Д. М., Сколник М. И. Загоризонтный радиолокатор ВЧ-диапазона // ТИИЭР. – 1974. – Т. 62. – № 6. – С. 6–17.
2. Вопросы перспективной радиолокации / В.Ф. Акимов, И.Б. Федоров, Г.П. Слукин и др.; Под ред. А.В. Соколова. – М.: Радиотехника, 2003. – 512 с.
3. Акимов В. Ф., Калинин Ю. К. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов. – М.: Типография ОАО «НПК «НИИДАР», 2012. – 546 с.

Статья поступила в редакцию 17.09.2012