

Разработка численного метода оценки энергетических требований к бортовым РЛС для метеонавигации в заполярных широтах

М.Б. Рыжиков, Ю.А. Новикова, Г.В. Терещенко,

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Аннотация: Для бортовых радиолокационных систем арктического назначения разработан новый численный метод расчета метеоусловий. На основе полученного в исследовании численного метода разработано программное обеспечение, учитывающее различные модели распространения электромагнитных волн в различных метеоусловиях. Представлены результаты вычислений, по оценке дальности обнаружения опасных метеоусловий. Данная оценка показывает то, что порог обнаружения неблагоприятных погодных условий может быть уменьшен. В основе снижения порога без ухудшения итоговых вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги лежит тот факт, что возникновение случаев ложного обнаружения возможно лишь тогда, когда достигается определенная суммарная протяженность сложных метеоусловий, которую можно уже считать опасной для полета. Рассматриваются особенности формирования сигналов, отражённых от арктических дождевых облаков, турбулентностей над заснеженной пустыней и сдвига ветра. Показано, что все они отличаются меньшей радиолокационной отражаемостью, поэтому получаемые дальности обнаружения меньше тех, которые могут быть получены в более южных широтах, но при этом их достаточно для навигации БПЛА или воздушных судов малой авиации.

Ключевые слова: бортовая РЛС, численные методы оценки метеоусловий, метеонавигация в заполярных широтах, навигация БПЛА, опасное метеообразование.

Введение

В сложных погодных условиях, характерных для арктического региона, безопасность полета беспилотного летательного аппарата (БПЛА) может быть гарантирована только при наличии бортового источника оперативной информации о потенциальной опасности метеоусловий по пути полета. Таким источником может выступить РЛС переднего обзора, но учитывая потенциальную необходимость возможности относительно дальних перелетов БПЛА необходимо снижать как массогабаритные показатели, так и энергетические затраты. Это с одной стороны, ограничивает возможность увеличения эффективной площади антенны, а с другой требует работы с малыми значениями мощности излучения. Таким образом, для арктических

регионов целесообразно разрабатывать такие РЛС, в которых предприняты меры по компенсации энергетических потерь сигнала, приводящих к уменьшению дальности обнаружения опасных для полета погодных условий путем снижения. Это можно сделать, если реализовать снижение порогового уровня в метеонавигационном радиолокаторе. Однако такое снижение не должно приводить к существенному падению качества обнаружения, которое комбинацией из порогового уровня, вероятностями ложной тревоги и правильного обнаружения.

Кроме того, при оценке самой дальности обнаружения следует учитывать отличия физических и геометрических параметров обнаруживаемых облаков, областей опасной турбулентности или сдвига ветра от тех, которые характерны для умеренных широт.

При оценке согласно основному уравнению радиолокации дальности действия когерентной импульсной РЛС, работающей в режиме обнаружения метеообразований возможно проводить обработку сигналов во временной или в частотной области. Учитывая то, что для БПЛА или ВС малой авиации, эксплуатирующийся, например, в арктических условиях, скорости перелетов меньше, в том числе из-за более плотной воздушной среды, поэтому и дальности заблаговременного обнаружения опасных гроз, областей турбулентности или сдвига ветра могут составлять не более 25-35 км. Это позволяет выбирать именно спектральную обработку, оценивая одновременно в импульсном объеме как отражающую способность грозовых фронтов, так и разброс скоростей ветровых потоков, то есть наличие областей опасной для полета турбулентности, или их математическое ожидание – то есть среднюю скорость, а затем проводить оценку существования значительного радиального сдвига ветра.

В настоящей статье предложена методика энергетического расчета максимальной дальности обнаружения, ориентированная на обнаружения

протяженной по пространству области сложных метеоусловий, характерных для заполярных широт. Показано, что обнаружение именно областей погодных условий, а не одного элемента, позволяет снизить требуемое отношение сигнал/шум без потери качества обнаружения по критерию Неймана-Пирсона.

Численный метод обнаружений опасных метеообразований

Поскольку в приемном тракте изделия линейно усиливается как отраженный сигнал, так и мощность шума, пересчитанная на вход блока антенного с выхода приемного тракта БРЛС, то и сравнение в частотной области значений мощности полезного сигнала и мощности шума идет на входе малошумящего усилителя блока антенного.

Для обнаружения опасных для полета метеообразований применяются, в зависимости от включенного масштаба, длительности импульса $\tau_{\text{имп}}$ от 0,2 до 2,1 мкс с низкой частотой повторения, обеспечивающей однозначный отсчет дальности. Учитывая то, что длительность элемента разрешения (ЭР) – δR по дальности оценивается по формуле

$$\delta R = 0,5 \cdot c \cdot \tau_{\text{имп}}, \quad (1)$$

где c – скорость света, равная $3 \cdot 10^8$ м/с, то размер ЭР по дальности ограничивается значением $\delta R_{\text{макс}} = 320$ м.

Согласно требованиям [1] для бортового радиолокатора, реализующего оценку опасности впереди расположенных грозовых фронтов в умеренных широтах, дальность обнаружения рассчитывается на случай обнаружения стандартной грозовой активности в области с фиксированным размером поперек направления распространения электромагнитной волны. Геометрический эквивалент для умеренных широт – цилиндрическая область, основание которой ориентировано по нормали к направлению распространения волны, а диаметр $d_{\text{обл}} = 5556$ м, для арктического слоисто-

дождевого облака $d_{\text{обл}}=3500$ м. Высота такого цилиндра совпадает с протяженностью импульсного объема δR .

Обнаружение области опасной турбулентности может быть реализовано с использованием аналогичного геометрического эквивалента, характерного для умеренных широт, с диаметром поперечного сечения цилиндра, равным $d_{\text{обл}}=500$ м [2], а также с высотой цилиндра δr , рассчитываемой по соотношению (2)

$$\delta r = \begin{cases} 0,5 \cdot c \cdot \tau_{\text{имп}} & (\text{если } 0,5 \cdot c \cdot \tau_{\text{имп}} < r_{\text{турб}}) \\ r_{\text{турб}} & (\text{если } 0,5 \cdot c \cdot \tau_{\text{имп}} \geq r_{\text{турб}}) \end{cases}, \quad (2)$$

где $r_{\text{турб}} = 500$ м.

В проведенных нами ранее исследованиях [3], установлено, что число ложных обнаружений опасной для полета турбулентности над арктической пустыней можно уменьшить, используя в качестве порога опасности среднеквадратическое отклонение скорости воздушных потоков не более $\sigma_{\text{турб}}=3$ м/с. Там же установлены и ограничения на ширину луча в зависимости от выбора длины волны зондирующих сигналов.

Указанный порог по СКО в целом слабо не более, чем на 10% отличается от значений порога опасности для областей турбулентности в умеренных широтах.

Поэтому и пространственные критерии опасности, которые предъявляются к протяженности областей опасной турбулентности в умеренных широтах можно применять и к заполярным широтам. Или использовать уменьшающий корректирующий множитель, равный 0,9, если предъявлять более жесткие требования, получив $r_{\text{турб}} = 450$ м. При используемых в БРЛС длительностях импульсов для обнаружения областей опасных турбулентностей выполняется соотношение $\delta r = 0,5 \cdot c \cdot \tau_{\text{имп}}$. И оно такое же, как при обнаружении арктических слоисто-дождевых облаков.

Согласно [4] существуют и пространственные ограничения, которые определены для сдвига ветра в умеренных и в более южных широтах. Если обратиться к рис. 1, то можно выделить ту часть воздушного горизонтального потока, которая довольно существенно меняется от центра области сдвига ветра к области растекания потока, создающего дополнительную подъемную силу для БПЛА, которая потом резко пропадает, а за ней следует сильный нисходящий поток воздуха. При попытке сохранять постоянную и малую высоту полета, БПЛА сбрасывает свою скорость и попадает в область, где возможно его падение из-за потери аэродинамической силы. Это и есть, по сути, самая опасная область – ядро сдвига ветра.

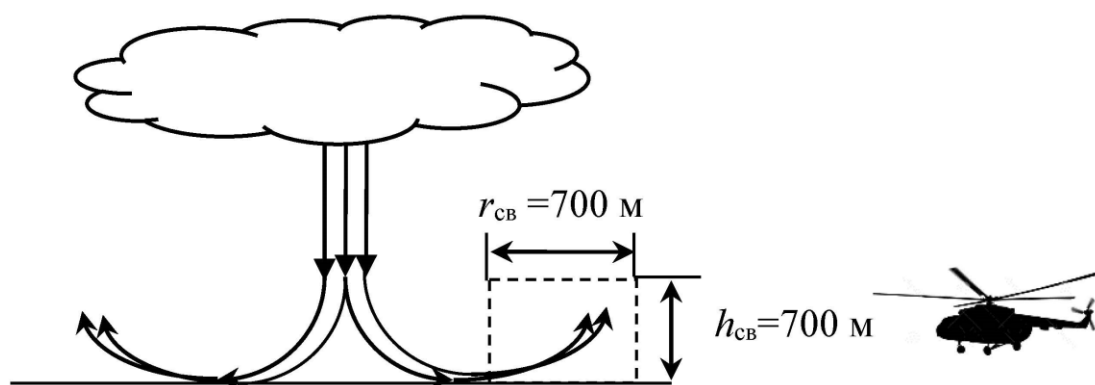


Рис. 1. – К обнаружению области опасного сдвига ветра

По дополнительным параметрам, которые гарантируют уменьшение числа случаев ложного обнаружения сдвига ветра, отток воздушных потоков должен существовать в пределах интервала дальности не менее $r_{св} = 700$ м (см. рис. 1).

Кроме того, максимальная высота, на которой еще анализируется наличие изменения горизонтальной составляющей скорости ветра, составляет $h_{св} = 700$ м [4]).

Учитывая равенство $r_{св}=h_{св}=700$ м, и то, что рекомендуемая для обнаружения сдвига ветра длительность импульса $\tau_{имп} < 1$ мкс [4] (а значит протяженность ЭР меньше $r_{св}$), можно принять за модель максимальной области сдвига ветра аналогичный цилиндр, но с диаметром поперечного сечения $d_{обл}=700$ м, и длиной, равной протяженности ЭР по дальности δR .

Учитывая вышеизложенное, объем любого метеообразования (часть СГЯ, область турбулентности, область сдвига ветра), отражающий зондирующие сигналы БРЛС, определяется выражением (3):

$$V_m = 0,5 \cdot c \cdot \tau_{имп} \cdot S_m, \quad (3)$$

где S_m – площадь поперечного сечения метеообразования, м².

Мощность сигнала $P_{вх}$, отраженного от зондируемой части метеообразования, которая расположена на расстоянии R , м, на входе маломощного усилителя блока антенного БРЛС будет определяться по формуле (4), полученной из основного уравнения радиолокации для объемно-распределенной цели [5]:

$$P_{вх} = \frac{\pi^2 \cdot P_{имп} \cdot |K|^2 \cdot K_{ант.прд} \cdot K_{ант.прм} \cdot Z \cdot c \cdot \tau_{имп} \cdot S_m \cdot 10^{-0,1 \cdot l_{атм} \cdot R}}{128 \cdot R^4 \cdot \lambda^2 \cdot L_{рлс}}; \quad (4)$$

где $P_{имп}$ – импульсная мощность, Вт; λ – длина волны; $K_{ант.прд}$ – коэффициент усиления антенны на передачу; $K_{ант.прм}$ – коэффициент усиления антенны на прием (в случае использования фазированных или активных фазированных антенных решеток они могут быть различны; $|K|^2$ – коэффициент, определяемый через диэлектрическую проницаемость частиц отражающего метеообразования (для случая зондирования снежных облаков составляет значение порядка 0,1); Z – радиолокационная отражаемость (РЛО), (вычисляется часто как $10^{0,1 \cdot ZdB} \cdot 10^{-18}$; ZdB – радиолокационная отражаемость, заданная в дБZ); $L_{рлс}$ – потери мощности при приеме и обработке мощности полезного сигнала РЛС; $l_{атм}$ – удельное двухстороннее затухание в атмосфере, дБ/м.

Площадь поперечного сечения метеообъекта S_m при обнаружении опасных грозовых фронтов, областей турбулентности или сдвига ветра в зависимости от дальности определяется соотношениями (5-7):

$$S_m = R^2 \cdot \Delta\beta_m(R) \cdot \Delta\varepsilon_m(R); \quad (5)$$

$$\Delta\beta_m(R) = \begin{cases} \Delta\beta, & \text{если } \theta(R) \geq \Delta\beta \\ 2 \cdot \theta(R), & \text{если } \theta(R) < \Delta\beta \end{cases}; \quad (6)$$

$$\Delta\varepsilon_m(R) = \begin{cases} \Delta\varepsilon, & \text{если } \theta(R) \geq \Delta\varepsilon \\ 2 \cdot \theta(R), & \text{если } \theta(R) < \Delta\varepsilon \end{cases}; \quad \theta(R) = \arctg\left(0,5 \cdot \frac{d_{обл}}{R}\right); \quad (7)$$

где $\Delta\beta_m$ – угловой размер модели отражающего объема по азимуту; $\Delta\varepsilon_m$ – угловой размер модели отражающего объема; $\Delta\beta$ – ширина диаграммы направленности антенны (ДН) по азимуту; $\Delta\varepsilon$ – ширина ДН по углу места; θ – угловой размер симметричной в поперечном сечении модели.

РЛО при оценке дальности обнаружения арктического облака, равно как зоны турбулентности или интервала существования сдвига ветра составляет максимальное значение, характерное для снежных осадков и равно $Z=10^{-13} \text{ м}^6/\text{м}^3$ или $Z=10^3 \text{ мм}^6/\text{м}^3$ т.е. $ZdB = 30 \text{ дБZ}$ [6].

Мощность полезного сигнала при обработке в спектральной области занимает несколько частотных отсчетов (фильтров), которые охватывают область наблюдаемых радиальных скоростей, закон распределения которых можно считать нормальным, но с разным среднеквадратическим отклонением в зависимости от наблюдаемого погодного явления.

Арктические облака отличает высокая вероятность наличия относительно крупных ледяных кристаллов или снежных частиц, которые в основном и определяют радиолокационную отражаемость ЭР [7]. При выпадении осадков ледяные кристаллы почти не отклоняются от линии вертикального падения, а крупный снег движется с горизонтальными скоростями не более $\pm 0,5 \text{ м/с}$ уже при высоте более 20 м над земной поверхностью, поэтому диапазон радиальных скоростей составляет 1м/с.

При обнаружении зон турбулентности число доплеровских фильтров, по которым распределена мощность полезного сигнала, больше, и для диапазона значений из $\pm 2\sigma_{\text{турб}}$ среднеквадратических отклонений диапазон радиальных скоростей равен $\Delta V = 4\sigma_{\text{турб}} = 12$ м/с.

Для оценки опасности сдвига ветра в точке пространства используют понятие F -фактора [5]. Последний определяется через соотношение скорости полета носителя и через такое изменение скорости воздушных потоков в пространстве, которое приводит к значению F -фактора, превышающему величину 0,13, равную порогу опасности сдвига ветра [8,9].

В [5] показано, что значение градиента скорости, приводящее к значению F -фактора выше порога, слабо зависит от скорости полета БПЛА, но требует в импульсном объеме протяженностью порядка 100 метров, изменение скорости $\Delta V = 1,5$ м/с.

Это позволяет вычислить оценку мощности полезного сигнала P^* , приходящуюся на один частотный фильтр:

$$P^* = \frac{P_{\text{вх}}}{\Delta nf}, \quad (8)$$

а по формуле (9) оценить число фильтров Δnf , по которым распределена мощность $P_{\text{вх}}$:

$$\Delta nf = 2 \cdot T_n \cdot N_{\text{бпф}} \cdot \frac{\Delta V}{\lambda}, \quad (9)$$

где $N_{\text{бпф}}$ – база быстрого преобразования Фурье; T_n – период повторения импульсов, с.

Обнаружение принятого полезного сигнала происходит при наличии входного шума. Мощность шумов $P_{\text{ш.вх.прм}}$ оценивается на входе малошумящего усилителя блока антенного по формуле (10):

$$P_{\text{ш.вх.прм}} = k \cdot T \cdot K_{\text{ш}} \cdot P_{\text{прм}}, \quad (10)$$

где k – постоянная Больцмана $= 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/°K; T – нормальная температура $= 290$ °K; $K_{\text{ш}}$ – коэффициент шума, пересчитанный с выхода приёмника на

вход блока антенного БРЛС; $P_{\text{прм}}$ – полоса пропускания аналогового приёмника, Гц.

Улучшение соотношения мощности сигнала к мощности шума шум достигается в цифровом фильтре с такой полосой частот, которая выбирается в соответствии с рекомендациями [10] и оценивается по формулам (11-12):

$$P_{\text{фнч}} = 1,4 / \tau_{\text{имп}} + 2 \cdot f_{\text{доп.макс}} \quad (11)$$

$$f_{\text{доп.макс}} = 2(V_{\text{н.макс}} + V_{\text{м.макс}}) / \lambda \quad (12)$$

где $f_{\text{доп.макс}}$ – максимальный доплеровский сдвиг частоты, Гц;

$V_{\text{н.макс}}$ – максимальная скорость носителя БРЛС, м/с.

$V_{\text{м.макс}}$ – максимальная скорость частиц внутри метеообразования, м/с.

Коэффициент $K_{\text{фнч}}$, характеризующий уменьшение мощности шума в ФНЧ задается соотношением (13):

$$K_{\text{фнч}} = P_{\text{фнч}} / P_{\text{прм}} \quad (13)$$

Порог для обнаружения во временной области вычисляется, как:

$$P_{\text{пор}} = P_{\text{ш.вх.прм}} \cdot K_{\text{фнч}} \cdot (S/N); \quad (14)$$

где (S/N) – среднее значение отношения сигнал/шум, рассчитываемое для заданных вероятностях правильного обнаружения $P_{\text{по}}$ и ложной тревоги $P_{\text{лт}}$, на случай приема флуктуирующего сигнала со случайной начальной фазой.

Следует учесть, что принятие решения о наличии по направлению зондирования опасного метеообразования производится в том числе по анализу его протяженности $\Delta L_{\text{м}}$, м, которая должна быть выше минимальных значений, которые составляют: при обнаружении арктического облака $\Delta L_{\text{мин}}=900$ м; при обнаружении областей турбулентности $\Delta L_{\text{мин}} = 450$ м, при обнаружении сдвига ветра $\Delta L_{\text{мин}} = 700$ м.

Это означает, что вероятность обнаружения ложного метеообразования – это вероятность его ложного обнаружения в нескольких элементах

разрешения подряд, минимальное число которых K_{\min} для режимов обнаружения грозовых фронтов и областей опасной турбулентности:

$$K_{\min} = \text{ceil}(\Delta L_{\min} / \delta R_{\max}) \quad (15)$$

где ceil – функция округления в большую сторону; δR_{\max} – максимальная протяженность ЭР по дальности.

Исключение составляет случай обнаружения сдвига ветра, в котором согласно рекомендациям [5] следует предъявлять более высокие требования из-за высокой корреляции оценок опасности в смежных ЭР и считать, что $K_{\min}=1$.

Таким образом значение вероятности ложной тревоги в одном ЭР $P1_{\text{лт}}$ может быть определено по соотношению:

$$P1_{\text{лт}} = K_{\min} \sqrt{P_{\text{лт}}} \quad (16)$$

Таким образом, при обнаружении метеообразований при оценивании требуемого отношения (S/N) справедливо соотношение [10]:

$$\left(\frac{S}{N}\right) = 2 \cdot \left(\frac{(\ln(P1_{\text{лт}}))^{-1}}{\ln(P_{\text{но}})^{-1}} - 1\right). \quad (17)$$

Переход из временной в частотную область приводит к тому, что мощность шума распределяется по всем отсчетам равномерно, а поэтому значение порога $P_{\text{пор}}$ находится по соотношению:

$$P_{\text{пор}} = P_{\text{мрс}} / N_{\text{БПФ}}. \quad (18)$$

Оценка дальности обнаружения метеообразования находится графическим методом как точка пересечения кривой, характеризующей падение полезной мощности от дальности (приходящейся на один фильтр БПФ), и прямой, соответствующей пороговому уровню [11].

В качестве примера расчета требований к бортовой метеонавигационной РЛС арктического назначения представлена оценка

максимальной дальности обнаружения опасных арктических слоисто-дождевых облаков, которая находится из рис. 2. графическим методом.

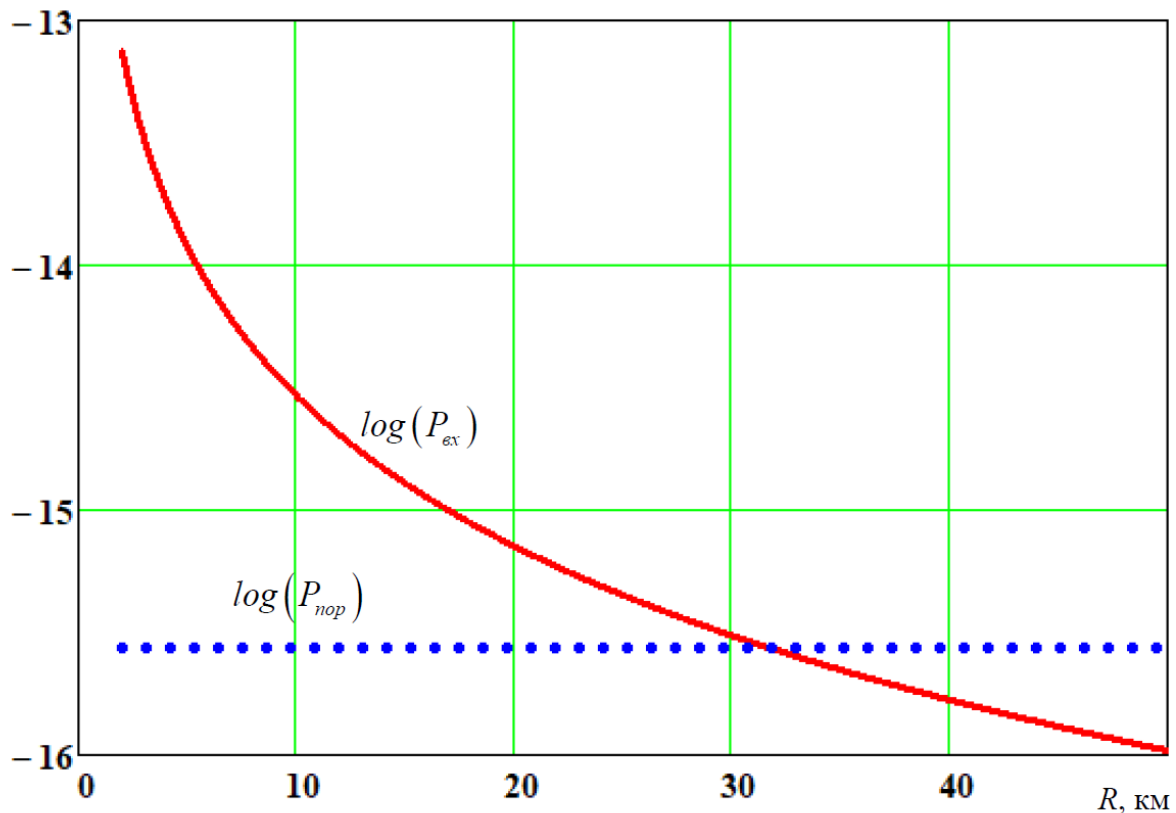


Рис. 2. – К оценке дальности обнаружения арктического слоистого дождевого облака

Для расчета подобраны такие параметры бортовой РЛС для метеонавигации: $\Delta\beta = \Delta\varepsilon = 3,2$, $P_{имп} = 500$, Вт; $\lambda = 0,034$ м; $K_{ант.прд} = K_{ант.прм} = 1000$; $K_{ш} = 4$ дБ; $L_{рлс} = 8$ дБ; $\tau_{имп} = 1$ мкс; $T_{п} = 0,52$ мс, $P_{лт} = 10^{-4}$, $P_{по} = 0,5$; $N_{бпф} = 128$, которые позволяют одновременно обрабатывать результаты БПФ с получением оценок опасности по турбулентности и по наличию повышенной радиолокационной отражаемости. Получены дальности обнаружения арктического облака более 30 км, а турбулентности более 12 км, а сдвига ветра более 7 км.

Полученные дальности при скоростях полета БПЛА не превышающих 120 км/ч на малых высотах дают достаточно времени для выбора и реализации маневра обхода областей с опасными погодными условиями.

Заключение

Разработаны численные методы, позволяющие при заданных параметрах бортовых РЛС и тактических требованиях, оценивать потенциальные дальности обнаружения метеообразований, опасных для полета в заполярных широтах. Она отличается тем, что ориентирована на работу с малым порогом по отношению сигнал/шум, который частично компенсирует существенно меньшую для Арктики радиолокационную отражаемость опасных для полетов областей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 23-29-00044.

Литература

1. Minimum Operational Performance Standards for Airborne Weather and Ground Mapping Pulsed Radars // Radio Technical Commission for Aeronautics, 1980 URL: standards.globalspec.com/std/622222/RTCA%20DO-173.
2. Madden M. Verifying Implementation of the Dryden Turbulence Model and MIL-F-8785 Gust Gradient // Modeling and Simulation Technologies Conference, 2018 URL: dx.doi.org/10.2514/6.2018-3580.
3. Ryzhikov M.B. Requirements for On-Board Radar Antennas to Reduce False Detections of Arctic Clouds Due to the Presence of Re-Reflections from the Earth's Surface // Conference: «2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems». Saint-Petersburg: WECONF, 2023, P. 1-5.
4. Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability // ARINC, 1999 URL: standards.globalspec.com/std/223707/ARINC%20708A.
5. RTCA DO-220, Minimum Operational Performance Standards for Weather Radar Systems // Radio Technical Commission for Aeronautics, 1993 URL: standards.globalspec.com/std/13105569/RTCA%20DO-220

6. Skolnik M.I. Radar handbook. Third Edition. NY: McGraw-Hill, 2008. 1352 p.
7. Коношонкин А.В., Боровой А.Г., Кустова Н.В., Шишко В.А., Тимофеев Д.Н. Рассеяние света на атмосферных ледяных кристаллах в приближении физической оптики. М : Физматлит, 2022. 386 с.
8. Manual on Low-level Wind Shear // International Civil Aviation Organization, 2005 URL: skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2194.pdf
9. Fred H.P., Hinton D.A., Bowles R.L. A windshear hazard index // Conference: «9th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology». Orlando: American Meteorology Society, 2000. P. 482-487.
10. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. М.: «Сов. радио», 1970. 560 с.
11. Кучерявенко А.В. Подавление турбинного эффекта радиолокационного сигнала в импульсно-доплеровской РЛС // Инженерный вестник Дона, 2017, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4440

References

1. Minimum Operational Performance Standards for Airborne Weather and Ground Mapping Pulsed Radars. URL: standards.globalspec.com/std/622222/RTCA%20DO-173 (accessed 27/11/23)
 2. Madden M. Verifying Implementation of the Dryden Turbulence Model and MIL-F-8785 Gust Gradient URL: dx.doi.org/10.2514/6.2018-3580 (accessed 27/11/23)
 3. Ryzhikov M.B. Conference: 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. Saint-Petersburg: WECONF, 2023, pp. 1-5.
-



4. Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability. URL: standards.globalspec.com/std/223707/ARINC%20708A (accessed 27/11/23)
5. RTCA DO-220, Minimum Operational Performance Standards for Weather Radar Systems. URL: standards.globalspec.com/std/13105569/RTCA%20DO-220 (accessed 27/11/23)
6. Skolnik M.I. Radar handbook. Third Edition. NY: McGraw-Hill, 2008. 1352 p.
7. Konoshonkin A.V., Borovoj A.G., Kustova N.V., Shishko V.A., Timofeev D.N. Rasseyanie sveta na atmosferyny`x ledyany`x kristallax v priblizhenii fizicheskoy optiki [Light scattering from atmospheric ice crystals in the physical optics approximation]. Moskva: Fizmatlit, 2022. 386 p.
8. Manual on Low-level Wind Shear. URL: skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2194.pdf (accessed 27/11/23)
9. Fred H.P., Hinton D.A., Bowles R.L. Conference: 9th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology. Orlando: American Meteorology Society, 2000. pp. 482-487.
10. Shirman Ya.D. Teoreticheskie osnovy` radiolokacii [Theoretical foundations of radar]. Moskva: Sov. radio, 1970. 560 p.
11. Kucheryavenko A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4440/.

Дата поступления: 29.11.2023

Дата публикации: 3.01.2024