

# РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНОГО ВИДА ОТОБРАЖЕНИЯ МЕТЕОНАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ДИСПЛЕЯХ ИНДИКАТОРОВ БОРТОВЫХ РЛС

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-5-38-47

**Рыжиков Максим Борисович,**  
Санкт-Петербургский Государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия,  
[maxrmb@yandex.ru](mailto:maxrmb@yandex.ru)

**Manuscript received** 27 March 2025;  
**Accepted** 20 April 2025

**Новикова Юлиана Александровна,**  
Санкт-Петербургский Государственный университет  
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия,  
[nov-jliana@yandex.ru](mailto:nov-jliana@yandex.ru)

**Ключевые слова:** метеонавигация, бортовая  
радиолокационная станция, индикация,  
визуализация

Задача повышения безопасности пилотирования воздушных судов малой авиации, совершающих свои полеты на высотах, не превышающих нижнюю границу облачности, зависит в том числе от полноты и скорости интуитивного восприятия метеонавигационной информации, позволяющей заблаговременно выбирать маршруты облета областей со сложными метеоусловиями. При этом визуализация данной информации в воздушных судах, предназначенных для международных перелетов, ограничена принятыми стандартными протоколами передачи данных. Анализируются ограничения, накладываемые по отображению метеонавигационной информации, существующие решения по получению и отображению более полных данных как о пространственных координатах, так и о степени опасности атмосферных образований, получаемых в бортовых РЛС. Предложены новые подходы к визуализации, увеличивающие информативность метеонавигационных данных, ориентированные на получение более интуитивно-понятых изображений. Цель работы – исследовать научно-технический задел, применяемый в бортовых радиолокаторах для анализа текущей метеообстановки, дополнить его предложениями по разработке перспективного вида отображения метеонавигационной информации на дисплеях индикаторов с обеспечением преемственности по критериям опасности, принятым в международных стандартах для бортовых РЛС. Приведены результаты анализа, подтверждающие целесообразность перехода от плоской - двумерной формы отображения метеонавигационной информации в псевдотрехмерном или трехмерном виде с визуализацией дополнительных слоев, полученных для текущего положения воздушного судна из векторных карт местности. Оценены требования к быстродействию процессора, реализующего вторичную обработку радиолокационных данных перед их потенциальным выводом на индикаторе. Результаты работы могут быть использованы в метеонавигационных бортовых импульсно-доплеровских РЛС с опциональным выводом изображения при гибридной визуализации.

#### Информация об авторах:

**Рыжиков Максим Борисович**, к.т.н., доцент, кафедра "Радиотехнических и оптико-электронных комплексов", ГУАП, Санкт-Петербург, Россия  
**Новикова Юлиана Александровна**, к.ф.-м.н., доцент, кафедра "Физики", ГУАП, Санкт-Петербург, Россия

#### Для цитирования:

Рыжиков М.Б., Новикова Ю.А. Разработка перспективного вида отображения метеонавигационной информации на дисплеях индикаторов бортовых РЛС // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №5. С. 38-47.

#### For citation:

M.B. Ryzhikov, Yu.A. Novikova, "Development of a modern type of display of meteorological navigation information on on-board radar indicator display," T-Comm, 2025, vol. 19, no.5, pp. 38-47. (in Russian)

**Введение. Постановка задачи исследования.**

Настоящая работа посвящена исследованию современных требований, тенденций и научно-технического задела, достигнутого в области визуализации метеокарт в режимах радиолокационного обнаружения опасных для полета грозовых фронтов и зон турбулентности, для выработки предложений по созданию прототипов перспективного, визуально ориентированного и интуитивно-понятного вида отображения информации о действующей метеонавигационной обстановки, на дисплеях бортовых индикаторов. Декомпозиция данной задачи подразумевает следующее деление:

- выдача предложений в части прототипа перспективного, визуально ориентированного вида отображения радиолокационной информации о метеообразованиях на дисплеях бортовых индикаторов;

- выполнение оценки требований ко времени накопления необходимого объема исходной информации и к быстродействию процессора бортовой цифровой вычислительной машины по обработке и формированию данных для вывода на индикаторе перспективного, визуально ориентированного

вида отображения радиолокационной или гибридной метеонавигационной информации.

**1 Понятия потенциально опасных для полетов метеообразований и текущие требования к визуализации бортовой метеонавигационной информации по международному стандарту ARINC 708A**

Степень опасности грозовых метеообразований связывают с определенным уровнем их радиолокационной отражаемости (РЛО), обозначаемой как Z, выражаемой в децибелах с обозначением дБZ. В свою очередь указанная степень опасности связана с интенсивностью выпадения осадков, измеряемой в мм/час [1]. В настоящее время большинство международных современных наземных и бортовых радиолокационных станций используют эмпирическую зависимость между радиолокационной отражаемостью и интенсивностью осадков, полученную американским сервисом погоды WSR-88D в 2014 году [2].

Типичные значения радиолокационной отражаемости облаков и осадков, интенсивности осадков, а также протяженностей по горизонтали и по вертикали для различных типов облаков представлены в таблице 1 [3-5].

Таблица 1

Тип облака	Протяженность по вертикали, км	Протяженность по горизонтали, км	Тип осадков	Радиолокационная отражаемость, дБZ	Интенсивность осадков, мм/час
Слоистые	0,4-1	до 300	осадков не дают	0	0
Высокослоистые	3- 6	до 100	мелкие осадки, обычно не достигают поверхности земли вследствие испарения	0	0
Высококучевые	нижняя граница варьируется в пределах 2-6 протяженность по вертикали 0,7		мелкие осадки, обычно не достигают поверхности земли вследствие испарения в подоблачном слое	0	0
Перистые	5-12	до 300	осадков не дают	0	0
Перисто-слоистые	5-8	до 300	осадков не дают	0	0
Перисто-кучевые	нижняя граница варьируется в пределах 4-8 протяженность по вертикали 1	до 300	осадков не дают	0	0
Кучевые	0,7-3,6	до 50	в умеренных широтах очень кратковременный (до 5 минут) редкий дождь или отдельные капли дождя	0-15	0-0,2
Слоисто-кучевые	0,8- 4,3	200-300	мелкий дождь	16 -35	0,25-5 (при меньшей интенсивности большая горизонтальная протяженность)
Слоисто-дождевые	0,2-3,7	10-50	умеренный дождь	35-47	5-40 (при меньшей интенсивности большая горизонтальная протяженность)
Кучево-дождевые с грозой	0,2-5	до 10	ливневые дожди	>47	>40

В соответствии с требованиями ARINC-708 для бортовых метеонавигационных радаров установлены единые градации по отображению потенциальной степени опасности для полетов, связанной с радиолокационной отражаемостью облаков и осадков. Области с различными значениями РЛО отображаются на индикаторе следующими цветами [6]:

20 дБZ ≤ Z < 30 дБZ – зеленый цвет,

30 дБZ ≤ Z < 40 дБZ – желтый цвет,

Z ≥ 40 дБZ – красный цвет.

Область опасной турбулентности - фиолетовый цвет (или пурпурный цвет).

Такое деление в соответствии с требованиями ARINC-708 приводит к тому, что на экранах метеонавигационных радаров авиационных носителей многие виды облаков и осадков не визуализируются (так как имеют радиолокационную отражаемость менее 20 дБZ), в том числе на современных метеонавигационных радаров RDR-4000 (для самолетов Boeing) и RDR-7000 (для самолетов малой авиации), что подтверждают данные материалов [7], из которых следует, что хорошо обнаруживаются мокрый град, дождь, мокрый снег; плохо – сухой град и совсем плохо обнаруживается сухой снег, не наблюдаются водяной пар, облака, туман.

Таким образом в бортовых РЛС, оценка опасности метеопрообразований для которых ведется по принятым в стандартах ARINC-708 и DO-220 порогам опасности, визуализируются только слоисто-кучевые, слоисто-дождевые, и кучево-дождевые с грозой, а также выпадение осадков в виде мокрого снега и дождя с интенсивностью более 0,5 мм/час.

При разработке перспективных радиолокационных метеонавигационных режимов в РЛС целесообразно прогнозировать построение зоны обзора, учитывающей то, что область с существенной, отражающей водностью и сама величина потенциальной грозовой облачности ограничена протяженностью по вертикали. И здесь нужно выделить две задачи, которые на сегодняшний день часто не принимаются во внимание.

Первая из них нужна для оценивания требуемых потенциальных требований по обнаружению метеопрообразований, которые, как следует из градаций по степени опасности, характеризуют часто лишь величиной Z, предполагая, что весь пространственный объем элемента разрешения целиком заполнен отражающими частицами. Это подтверждается формулой [1], которая связывает мощность сигнала P, отраженного от элемента разрешения, который расположен на расстоянии R:

$$P = C_I \frac{|K|^2 Z \Delta\beta \Delta\epsilon \cdot 10^{-0,2lR}}{R^2 \lambda^2},$$

где C<sub>I</sub> – коэффициент, зависящий от параметров станции и зондирующего сигнала; |K|<sup>2</sup> – коэффициент, учитывающий диэлектрическую проницаемость водной частицы при текущей длине волны излучения, Z – радиолокационная отражаемость метеоцели; Δβ – ширина диаграммы направленности антенны (ДН) по азимуту; Δε – ширина ДН по углу места; λ – дл на волны; l – удельное затухание в атмосфере.

Однако в случае относительно больших значений РЛО – область пространства, занятая метеопрообразованием, ограничена по высоте некоторым значением ΔH, а на значительных дальностях при относительно большой угловой ширине луча Δε – его линейный размер больше высоты грозового фронта, поэтому часть мощности не отражается, а распространяется

дальше, не испытывая отражения. Фактически граничное условие полного заполнения элементом разрешения отражающим облаком по высоте можно сформулировать в простой форме

$$R \leq \frac{\Delta H}{\Delta \epsilon_{\max}}.$$

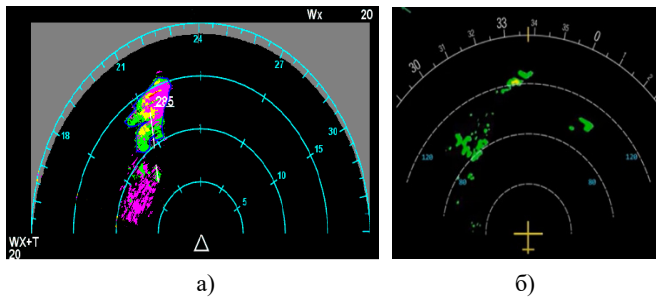
При этом следует учитывать и различия в структуре облачности для разных географических регионов. Высота грозовой ячейки в тропических широтах (ΔH ≈ 20 км), что почти вдвое больше чем высота грозовой ячейки в средних широтах [8].

Кроме того, сильные грозовые ячейки могут быть единичными, в том числе ограниченными и по горизонтали. С отменой стандарта RTCA DO-173, в котором предлагалось проводить вычисления дальности метеонавигационной РЛС по грозовой ячейке диаметром порядка 5,5 км пропала возможность получать прогнозы по дальности обнаружения стандартной метеоцели, что привело часто к завышенным расчетным потенциальным дальностям обнаружения опасных гроз. При этом получается, что расчеты потенциальных характеристик бортовых РЛС ведутся без учета оценки эффективности применения в потенциальном регионе эксплуатации. Так для заполярных широт требования к критериям опасности должны быть иными, чем те, которые декларируются в международных требованиях рекомендациях [1, 6, 7] к бортовым РЛС в целом. Это подтверждают и результаты исследований, представленные в [9-11].

Вторая задача – выбор закона сканирования в вертикальной плоскости, который с одной стороны должен охватить весь диапазон высот, который может быть занят потенциальными метеопрообразованием на ближних и средних дальностях, а с другой – на относительно больших дальностях должен исключать касания лучом земной поверхности и случаев зондирования выше верхней границы облачности. По этой причине прогнозируемую протяженность грозовых ячеек по вертикали целесообразно использовать для оценивания той области пространства, которую необходимо просматривать с учетом высоты полета воздушного судна.

Решение этих двух задач совместно позволяет реализовать разумный выбор той зоны обзора – ее размеров по дальности и по углам, что позволяет в дальнейшем оценить требования к памяти и быстродействию процессора индикатора, который потенциально может выводить 3D изображения метеопрообразований.

Проведем текущий анализ способов отображения радиолокационной информации в индикаторах метеонавигационных РЛС. При работе любого международного авиационного метеонавигационного радара индикация стандартизирована (по требованиям процедур сертификации (в США и в Европе) и соответствующих стандартов ARINC) и обязана содержать отображение на черном фоне потенциально опасных для полета погодных областей на плоскости в полярных координатах «Азимут» – «Дальность» (2D – визуализация), наличие и степень опасности которых кодируются указанными ранее градациями цвета (зеленый, желтый, красный, фиолетовый). Примеры обязательной стандартной 2D – визуализации изображения для различных современных радаров приведены на рисунке 1.



**Рис. 1.** Примеры сертифицированной 2D визуализации метеонавигационной информации в полярных координатах азимут-дальность (а – Rockwell Collins RTA-4100 MultiScan (для оснащения самолетов Airbus); б) – Honeywell Aerospace Technologies RDR-4000 (для оснащения самолетов Boeing)

Это стало возможным, так как кроме метеонавигационного радара «Garmin» разрабатывает и производит индикаторы, а также приемопередатчики для создания радиолинии связи с землей с целью получения вспомогательных (дополнительных) навигационных данных, в том числе для передачи на борт собственных детальных цифровых карт местности «Garmin» для их последующей индикации на страницах навигации. Таким образом, комплекс из собственной бортовой РЛС и индикатора позволяет компании «GARMIN» реализовывать альтернативный подход к визуализации метеонавигационных данных [12, 13]. В целом получаемое изображение при этом сохраняет определенную преемственность по отношению к тем, которые заданы в базовых сертификационных требованиях по построению 2-D визуализации, но есть ряд отличий:

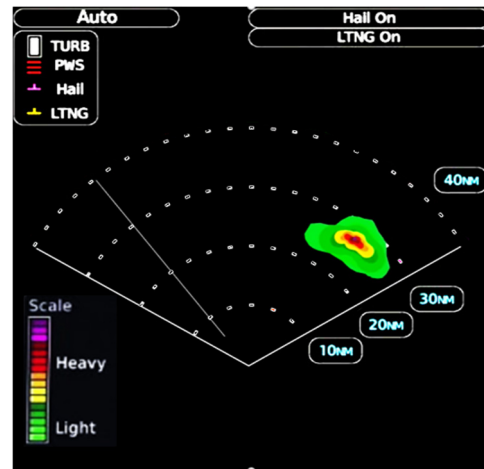
1) визуализация РЛО в 16-ти цветной палитре (помимо черного цвета), как это показано на рисунке 2.

Enhanced Color Palette	Intensity (in dBZ)
Black	<23 dBZ
Green	23 or 24 dBZ
Green	25 or 26 dBZ
Green	27 or 28 dBZ
Green	29 or 30 dBZ
Green	31 or 32 dBZ
Yellow	33 or 34 dBZ
Yellow	35 or 36 dBZ
Yellow	37 or 38 dBZ
Yellow	39 or 40 dBZ
Red	41 or 42 dBZ
Red	43 or 44 dBZ
Red	45 or 46 dBZ
Red	47 or 48 dBZ
Magenta	49-50 dBZ
Magenta	51-53 dBZ
Magenta	>54 dBZ

**Рис. 2.** Расширенная палитра визуализации РЛО

2) отображение турбулентности выполняется белым цветом.

На рисунке 3 представлен пример изображения с расширенной цветовой палитрой, которая более точно позволяет передавать изменения градаций интенсивности осадков в разных областях пространства в пределах потенциально опасного метеообразования.

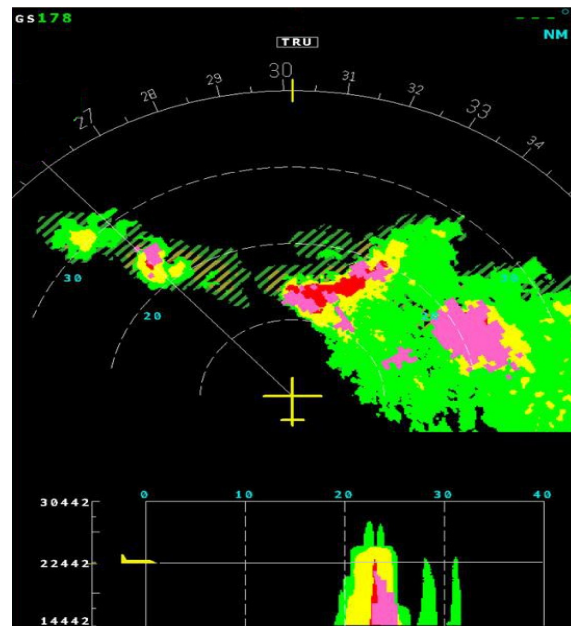


**Рис. 3.** Пример 2D визуализации метеонавигационной информации в режиме «Гроза» в БРЛС «GWX-8000» (компании «Garmin»)

## 2 Дополнительные виды изображений для увеличения полезной метеонавигационной информации на индикаторе при использовании 3-D сканирования

Стандартный вид и задержка получения всех метеонавигационных данных плохо влияет на оперативность пилота при принятии решений о маневрах облета областей с опасными погодными условиями [14]. Для решения задачи метеонавигации в условиях полета по длительному сложному маршруту в бортовой метео РЛС может быть предложен режим автоматического 3-D сканирования с формированием 3-D буфера радиолокационной и навигационной информации с последующим выводом «псевдо 3-D» изображения в горизонтальном и вертикальном сечениях, имеющего более понятный и визуально ориентированный для оператора вид отображения метеообразований.

Для индикатора бортового радара RTA-4100 MultiScan визуализация изображения, полученного после 3-D сканирования, приведена на рисунке 4.



**Рис. 4.** Пример «псевдо 3-D» визуализации на индикаторе бортовой РЛС RDR-4100

Поскольку графическое изображение по-прежнему должно удовлетворять стандартам ARINC (выводу изображения в плоских полярных координатах «Азимут»-«Дальность»), то для его визуализации также используется «псевдо 3-D» визуализация, а области, которые лежат ниже высоты полета, при отображении на индикаторе перечеркиваются штриховыми линиями.

При управлении азимутом вертикального сечения, которое визуализируется на экране, можно просмотреть распределение РЛО облака по высоте. Представляемая на индикаторе визуализация метеобстановки довольно продолжительное время не меняется, при этом маркер положения носителя движется по «замороженному» горизонтальному изображению, используя необходимую для формирования радиолокационной информации (РЛИ), накапливаемой в буфере данных.

В качестве накапливаемых параметров выступают: азимут, угол места, дальность до центра элемента разрешения по дальности, значение в нем РЛО, оценки радиальной скорости ветра и СКО радиальных скоростей, которое может выступать критерием опасной турбулентности [15]. Смена кадра изображения, выводимого на индикатор происходит тогда, когда 3-D буфер накопит очередную порцию необходимой информации и сформируется новый кадр «псевдо» 3-D визуализации (в случае незначительного поворота изображения из-за смены курса носителя).

При достаточно существенной смене курса носителя ввиду нецелесообразности использования накопленных в 3-D буфере данных, возможен уход в режим 2-D сканирования с обеспечением той же «псевдо 3-D» визуализации, но с потерей изображения заштрихованных областей (содержащих метеоданные на других высотах). Следует отметить, что в случае малых изменений курса заполнение 3-D буфера возможно даже при использовании достаточно больших масштабов дальностей, а полет может выполняться довольно длительное время с использованием визуализированного изображения, сформированного по ранее полученной метеонавигационной информации.

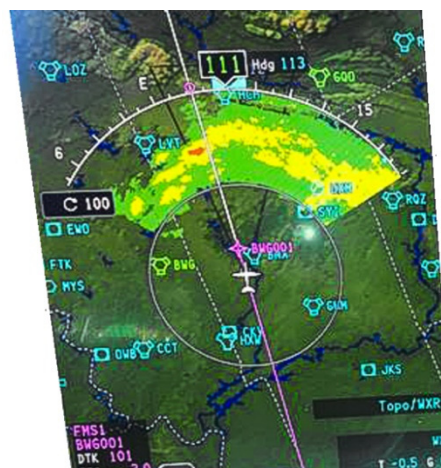
Рассмотрим работу в режиме 3-D сканирования самолетного локатора «RDR-4100 MultiScan» по формированию кадров «псевдо» 3-D изображения с использованием накопленных данных в буфере радиолокационной информации. Для накопления РЛИ при использовании 3-D сканирования используется 17 кадров обзора по 4 секунды каждый с целью получения первичных радиолокационных данных о грозовой активности и турбулентности. Далее выполняется этап обработки этой полученной информации и ее дальнейшая визуализация. За время набора и формирования очередного кадра «псевдо» 3-D изображения (порядка 120 с) самолет успевает пролететь от 30 до 40 км, при этом оператор (пилот) пользуется данными предыдущего кадра «псевдо» 3-D изображения. Таким образом, при работе в режиме 3-D сканирования доступные пилоту самолета масштабы изображения начинаются с 72 км (40 морских миль).

Для маловысотных воздушных полетов (со скоростью порядка 50 м/с) аналогичное по времени накопление приводит к достоверности масштабов дальности с нижней границей порядка 6 км. Но время можно и существенно уменьшить, поскольку верхняя граница облета у такого класса воздушных судов часто не превышает 4-5 км, что позволяет снизить зону сканирования по углу места вдвое (в умеренных широтах,

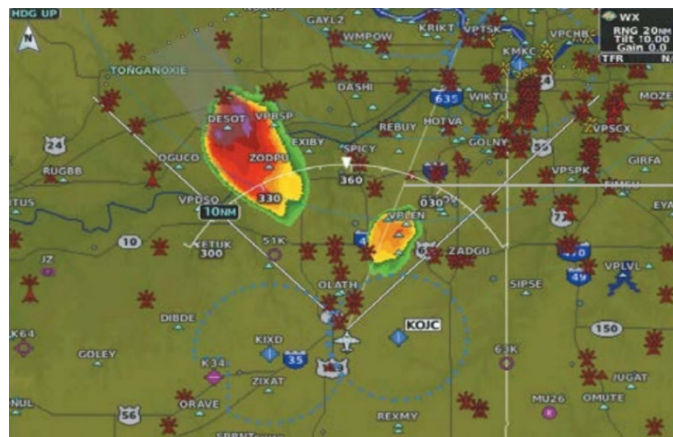
верхняя граница облачности лежит на высотах 8-11 км) и получить нижнюю границу для масштабов дальности визуализируемого «псевдо» 3-D изображения порядка 3 км.

### 3 Дополнительные виды информации, выводимой для увеличения информативности радиолокационных изображений. Предложения по внедрению новых интуитивно-понятных способов индикации метеонавигационных данных

При решении задачи метеонавигации по маршруту полета, кроме реальной погодной обстановки и курса целесообразно добавить опционально режим автоматического вывода на индикаторе слоя цифровой карты местности, совмещаемой с выводимым РЛИ. При этом чаще всего само совмещенное изображение выводится в окне «Навигация» [13]. Примеры визуализации выглядят так, как показано на рисунке 5а,б.



а)



б)

Рис. 5. Примеры варианты вывода совмещенных изображений топографической карты, слоя навигационных данных и метеонавигационной информации: а) и цифровой карты местности; б) метеонавигационной информации

Следующим шагом по расширению функциональных возможностей штурмана по навигации стало подключение внешней метеонавигационной информации: это или передача через спутниковую линию связи объединениях вместе данных с сети наземных РЛС (технология NEXRAD в США) с темпом

обновления порядка 2,5 минут и вывод рядом изображений с радара и с наземных РЛС. Такое объединение позволяет лучше анализировать достоверность и точность погодных условий и упрощает навигацию воздушного судна (рис. 6а).



Рис. 6. Совместное использование метеонавигационной информации, получаемой через систему NEXRAD США) и с бортовой РЛС GWX-70 (рис. 6а) и отдельное использование технологии NEXRAD (рис. 6б)

В случае неисправности или отсутствия БРЛС система является единственным источником метеонавигационной информации (рис. 6б), недостатки которой – медленный темп обновления данных и неравномерность покрытия территории США наземными метео РЛС, которая приводит иногда к плохой разрешающей способности метеоданных, иногда к ее отсутствию в некоторых регионах. Поэтому создание автономной системы метеонавигации по-прежнему является актуальной задачей, особенно для малых воздушных судов, где ее достоверность и детализация обеспечивают полета.

Практику использования дополнительного планшета со спутниковыми метеонавигационными данными использует не только компания GARMIN (приложение GARMIN PILOT), но и компания Honeywell Aerospace Technologies, выдавая пилотам самолётов Boeing планшет с приложением Weather Information Service, полностью ориентированный для прокладки маршрута и текущей навигации с учетом погодных условий, получаемых со спутника.

Таким образом, в бортовых метеонавигационных РЛС для обеспечения формирования на дисплеях бортовых индикаторов перспективного, визуально ориентированного для оператора вида отображения РЛИ метеообразований можно рекомендовать два варианта исполнения (базовый и дополненный). Первый вариант – базовый соответствует международными требованиями и представляет собой «псевдо» 3-D изображение, второй вариант формирует полноценное 3D изображение сектора полученной радиолокационным способом метеообстановки.

Их совмещение возможно, так как обоим вариантам исполнения присущи одинаковые методы получения метеоинформации, и оба варианта имеют общие характерные признаки выводимого на индикатор изображения, а именно:

- 1) выполнение автоматического сканирования пространства в горизонтальной плоскости при разных углах наклона (с целью получения данных о метеообстановке в необходимом для безопасного полета диапазоне высот);
- 2) применение автоматического масштабирования изображения в зависимости от дальности до обнаруженных опасных метеообразований и их протяженности по радиальным направлениям;

- 3) использование в формируемом на дополненном изображении многоцветной палитры, которую предлагается реализовывать примерно так, как это сделано в метеонавигационной РЛС «GWX-8000» компании «Garmin» (см. рис. 2), но с большим числом градаций цветов и визуализации не только случаев наличия дождевых, кучево-дождевых и грозовых ячеек и дождя с РЛО более 20 dBZ, но и случаев облачности не опасной для полета, но способной уменьшить эффективность работы оптико-электронных систем, используемых на борту воздушного судна;

- 4) формирование одновременно двух видов визуализации РЛИ (горизонтальное сечение и вертикальное сечение), совместно выводимых на индикаторе:

- а) горизонтальное сечение – представляет собой 2D изображение оценки опасности метеообстановки, полученное при автоматически выбранном угле наклона, или объемное 3-D изображение (как результат интерполяции по данным, полученным в горизонтальных сечениях с разными углами наклона), например, такое, как это показано на рисунке 7.

- б) вертикальное сечение – представляет собой 2D изображение оценки опасности метеообстановки в вертикальном сечении. Вертикальное сечение формируется:

- по курсу полета (или вектору путевой скорости) при отсутствии наиболее опасных областей при азимутальном сканировании,

- по азимуту в направлении на центр обнаруженного наиболее опасного метеообразования – с радиолокационной отражаемостью более 30 dBZ и расположенного с нижней границей по дальности не менее 3-6 км (из-за времени накопления данных в буфере);

- 5) вывод цифровой карты местности, которая при ее наличии для данной местности, визуализируется вторым слоем, помогает оператору ориентироваться в сложной метеообстановке. В «псевдо» 3-D изображении этот слой формируется, как на горизонтальной развертке, так и на вертикальной. На вертикальной развертке земля – прорисовывается как рельеф высот – единым, например, коричневым или темно серым цветом.

Проект предлагаемого для визуализации 3-D РЛИ, совмещенного с цифровой картой местности Санкт-Петербурга, с масштабом дальности 5 км и просмотром области высот для построения метеокарты от 0,5 до 2,5 км представлен на рисунке 7.

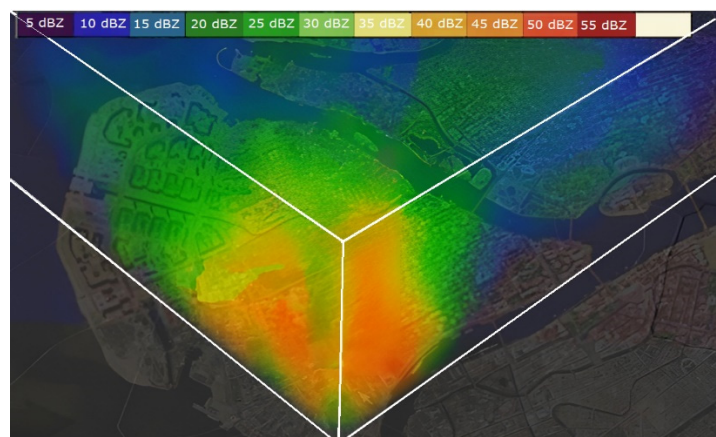


Рис. 7. 3D – РЛИ метеонавигационной информации с постилающей ЦКМ (для упрощения навигации, молочным цветом обозначается область опасной турбулентности)

Для избежания влияния на метеокарту переотражений от земной поверхности следует применять антенны с уменьшенным уровнем боковых лепестков в нижней полусфере и автоматическим подъемом луча, зависящим от высоты полета носителя бортовой РЛС. Такие решения предложены в [16, 17]. При этом они являются актуальными и перспективными, так как базируются на применении технологий ФАР или АФАР, которые все чаще рассматриваются как современная замена волноводно-щелевых антенных решеток с механическим сканированием луча [18, 19]. Они же позволяют создавать многофункциональные системы не только для метеолокации, но и для задач радиовидения, параметры, функциональное назначение которых также должны выбираться или адаптироваться с учетом региона применения, как, например, это сделано в случае ориентации на работу в заполярных широтах [20].

#### **4 Выполнение оценки временных требований по накоплению необходимого объема исходной метеонавигационной информации. Оценка требований к быстрдействию бортового вычислителя для вывода на индикаторе 3-D отображения метеонавигационной информации**

Для построения изображения метеонавигационной обстановки с автоматическим масштабированием по дальности в зависимости от текущей метеобстановки в «псевдо»-3D или в 3D виде необходимо использовать накопление некоторого объема полученной радиолокационной информации в буфере данных.

Построение «псевдо»-3D изображения при 2-D сканировании – не занимает много времени, так как при его формировании используется накопление двух кадров сканирования (горизонтального и вертикального), которые вместе с выводом РЛИ на индикатор занимают время не более 10 с. Требования к буферу этих данных не рассматриваются, так как они не значительны в сравнении с требованиями к буферу данных при реализации 3-D сканирования.

Для получения 3-D изображения следует учесть, что при крейсерской скорости 70 м/с вертолет пролетает расстояние в 3 км примерно за 43 с. Это означает, что значительную часть этого времени придется потратить на сбор радиолокационной информации, а оставшиеся несколько секунд – на ее обработку и визуализацию.

Если за 28 с сделать 7 кадров обзора (скорость обзора 4 кадра/с) по горизонтали и 1 кадр обзора по вертикали (за 2 с), то оставшиеся 13 с можно потратить на обработку полученной информации (т.е. на подготовку к визуализации и на вывод данных). В автоматическом режиме просматривается не вся область пространства по вертикали, а только та ее часть, которая может быть использована для обхода вертолетом кучево-дождевой облачности (с учетом ее потенциальной нижней границы), то есть на высотах от 500 до 4000 м. Радиолокационная отражаемость нелинейно меняется от нижней до верхней границы облачности, поэтому для ее интерполяции по высоте необходимо иметь как можно больше срезов с разным углом места. При сборе радиолокационной информации будем просматривать 7 сечений (кадров), которые на конце масштаба дальности расположены по высоте через 500 м.

Чтобы увеличить скорость сбора радиолокационной информации следует сканировать в совмещенном режиме обнаружения грозных фронтов и областей турбулентности, что

позволит сразу формировать данные о радиолокационной отражаемости и ширине спектра доплеровских частот. При этом возникает ограничение по максимальному масштабу дальности для 3-D визуализации значением 50 км.

При отсутствии существенного изменения курса автоматически проводится «замораживание» области зондируемого пространства в стабилизированной горизонтированной системе координат. Исследуемая область пространства по дальности может составлять от 3 до 48 км с достаточно большим числом элементов разрешения дальности:  $(48-3) \text{ км}/100\text{ м} = 450$  дискретов дальности. При этом максимально просматриваемый диапазон углов по азимуту составляет 120 градусов (80 угловых направлений через  $1,5^\circ$ ). Это означает, что буфер радиолокационной информации состоит из 36 000 дискретов дальности на одном кадре, и, соответственно из 252 000 дискретов при семи накопленных горизонтальных кадрах. В этом случае в буфере данных по каждому элементу разрешения требуется сохранить 5-ть 32-битных слов (два слова – для значений радиолокационной отражаемости и ширины спектра, и три слова – для значений координатных составляющих по X, Y и Z, полученных из текущих значений дальности, азимута и угла места до центров элементов разрешения). Таким образом, требуемый размер буфера памяти для хранения радиолокационной информации составит  $5 \cdot 32 \cdot 252 \cdot 10^3 \text{ бит} = 5,04 \text{ Мб}$ . В случае передачи этих данных в видеопроцессор за время, составляющее не более 20% от времени, выделенного на обработку, требуется обеспечить скорость передачи данных не менее 2 Мб/с.

При выполнении обработки накопленной в буфере радиолокационной информации кадра, наибольшей емкостью обладает циклически выполняемая интерполяция данных, обеспечивающая получение для визуализации значений в регулярной сетке по координатам X, Y и Z с заданными шагами (порядка 100 м). В случае использования квадратичной интерполяции в скользящем окне из трех элементов по координате Y и линейной интерполяции по координатам X и Z по восьми точкам, количество выполняемых операций типа сложение и вычитание составляет величину порядка 8 млн, а операций типа умножение и деление – порядка 7 млн.

Возможный порядок проведения операций по интерполяции разных пространственных метеонавигационных данных и предлагаемому способу их сохранения в буфере подробно описан в [21].

Количества выполнения операций чтения при обращениях к памяти составляет порядка 10 млн, таким общее количество операций порядка 25 млн за 11 с, и производительность не менее 2,5 MFLOPs для подготовки изображения. Это не самые высокие требования по производительности при построении 3D отображений в реальном масштабе времени.

#### **Заключение**

Рассмотрены современные требования к визуализации метеонавигационной информации в бортовых РЛС. Показано, что если они выполняются только в рамках международных стандартов к погодным бортовым РЛС, то они не являются источником интуитивно-понятной, ориентированной на быстрое восприятие метеонавигационной информацией и должны быть опционально дополнены. В этой связи раскрыта идеология построения «псевдо» 3D визуализации, описан

опыт ее исполнения в современных бортовых РЛС и предложено более информативное решение на основе накопления и последующего 3D отображения метеонавигационной информации, совместно с цифровой картой местности, а также одновременным выводом дополнительного изображения с РЛИ вертикального слоя (с наличием данных о профиле земной поверхности) выбранного оператором бортовой РЛС при поиске маневра облета или обхода.

### Литература

1. *Morbidelli Renato*. Rainfall: Modeling, Measurement and Applications, Elsevier, USA, 2022, 502 p.
2. *Chandrasekar V., Beauchamp Robert M., Bechini Renzo*. Weather Radar Introduction to Dual Polarization Weather Radar: Fundamentals, Applications, and Networks, Cambridge University Press, UK, 2023, 400 p.
3. *Yang J., Zhao Z., Zhu Q., Han J., Zhang Q., Li S.* The Impact of Raindrop Size Distributions on the Propagation Characteristics and Differential Parameters of X-Band Polarimetric Weather Radar // 2024 14th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (IS-APE), Hefei, China, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/IS-APE62431.2024.10840453.
4. *Ran Y., Wang H., Tian L.* Precipitation cloud identification based on faster-RCNN for Doppler weather radar // J Wireless Com Network, vol. 19, 2021, pp.1-20.
5. *Ryzhkov Alexander V., Zrníc Dusan S.* Radar Polarimetry for Weather Observations, Springer International Publishing, Germany, 2019, 831 p.
6. Standard ARINC708A-3. Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability, ARINC, Cedar Rapids, Iowa, USA. 1999, 120 p.
7. Standard RTCA DO-220. A.2016. Minimum Operational Performance Standards for Airborne Weather Radar Systems. Washington, United States. 2016. 210 p.
8. *Базлова, Т.А., Бочарников, Н.В., Брылев, Г.Б., Букатич, С.В., Линева, А.Г.* Радиолокационная метеорологическая информация в авионавигации. СПб.: РГГМУ. 2014. 363 с.
9. *Рыжиков, М. Б., Бестугин, А. П., Новикова, Ю. А., Киришина И. А.* Временная автоматическая регулировка усиления в метеонавигационном радиолокаторе при отражении сигнала от стандартной грозовой ячейки или от арктического слоисто-дождевого облака // Электромагнитные волны и электронные системы. 2023. Т.28. №2. С. 21-28.
10. *Ryzhikov M.B.* Requirements for On-Board Radar Antennas to Reduce False Detections of Arctic Clouds Due to the Presence of Reflections from the Earth's Surface // 2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10148050.
11. *Ryzhikov M.B.* Investigation of Conditions for Reducing the Number of False Wind Shear Detections in the Onboard Ka-band Radar for Polar Latitudes // 2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), St. Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/WECONF61770.2024.10564603.
12. *Haolin Wang, Xu Guan, Jiao Li, Yanbo Peng, Guoqiang Wang, Qingzhu Zhang, Tianshuai Li, Xinfeng Wang, Qingpeng Meng, Jiaqi Chen, Min Zhao, Qiao Wang.* Quantifying the pollution changes and meteorological dependence of airborne trace elements coupling source apportionment and machine learning // Science of The Total Environment, Vol. 948, 2024, pp. 1-4.
13. *Ison David.* Navigating Weather: A Pilot's Guide to Airborne and Datalink Weather Radar, Aviation Supplies & Academics, Inc., USA, 2021, 184 p.
14. *Lesheng Hua, Chen Ling, Rick Thomas.* Effects of delayed weather radar images on pilots' spatial awareness // Applied Ergonomics, Vol. 98, No. 103598, 2022, pp. 1-7, doi: 10.1016/j.apergo.2021.103598.
15. *Hamilton David W., Proctor Fred H., Ahmad Nash'at N.* Flight Tests of the Turbulence Prediction and Warning System (TPAWS), Report NASA TM-2012-217337, VA: NASA Langley Research Center Hampton, USA, 2012, 152 p.
16. *Рыжиков М.Б.* Разработка микрополосковой решетки с наклонным раскрытием и сниженным числом элементов регулировки амплитудно-фазового распределения для маловысотной метеонавигации БПЛА в Арктике // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. №10. С. 13-19.
17. *Рыжиков М.Б.* Уменьшение уровня боковых лепестков в кластерных микрополосковых антенных решетках бортовых метеонавигационных РЛС для заполярных широт // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Т. 18. № 11. С. 22-29.
18. *Uno T., Uesaka T., Nakamoto N., Fukasawa T., Takahashi T., Inasawa Y., Yamamoto T., Koyanagi T., Kakimoto I., Konishi Y. Y.* Design of a Dual-Polarized Low Sidelobe Slotted Waveguide Antenna for C-Band Phased Array Weather Radar // 2022 IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST), Waltham, MA, USA, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/PAST49659.2022.9975055.
19. *Palmer R.D., Yearly M.B., Schwartzman D., Salazar-Cerreno J.L., Fulton C., McCord M., Cheong B., Bodine D., Kirstetter P., Sigmarsson H.H., Yu T.-Y., Zrníc D., Kelley R., Meier J., Herndon M.* Horus – A Fully Digital Polarimetric Phased Array Radar for Next-Generation Weather Observations // IEEE Transactions on Radar Systems, vol. 1, pp. 96-117, 2023, doi: 10.1109/TRS.2023.3280033.
20. *Рыжиков М.Б., Новикова Ю.А., Киришина И.А., Сванидзе В.Г.* Энергетические соотношения, типы зондирующих сигналов и внутрипериодная сигнальная обработка в РЛС бортового базирования, предназначенных для построения карт арктической поверхности // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. № 6. С. 29-37.
21. *Рыжиков М.Б., Новикова Ю.А., Терещенко В.Г.* Численное моделирование для проверки режима обнаружения сдвига ветра в имитаторах радиолокационных сигналов для бортовых РЛС // Инженерный вестник Дона. 2024. №12. С.1-16.

## DEVELOPMENT OF A MODERN TYPE OF DISPLAY OF METEOROLOGICAL NAVIGATION INFORMATION ON ON-BOARD RADAR INDICATOR DISPLAY

**Maksim B. Ryzhikov**, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, [maxrmb@yandex.ru](mailto:maxrmb@yandex.ru)

**Yuliana A. Novikova**, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia, [nov-jliana@yandex.ru](mailto:nov-jliana@yandex.ru)

### Abstract

The task of improving the safety of piloting small aircraft flying at altitudes not exceeding the lower cloud limit depends, among other things, on the completeness and speed of intuitive perception of meteorological navigation information, which makes it possible to choose flight routes in advance in areas with difficult weather conditions. At the same time, the visualization of this information in aircraft intended for international flights is limited by the accepted standard data transmission protocols. The limitations imposed on the display of meteorological navigation information, existing solutions for obtaining and displaying more complete data on both spatial coordinates and the degree of danger of atmospheric formations received in on-board radars are analyzed. New visualization approaches have been proposed that increase the information content of meteorological navigation data and focus on obtaining more intuitive images. Purpose – to investigate the scientific and technical groundwork used in on-board radars to analyze the current meteorological situation, to supplement it with proposals for developing a promising type of display of meteorological navigation information on indicator displays, ensuring continuity according to the hazard criteria adopted in international standards for on-board radar, focused on obtaining more intuitive images. The results of the analysis are presented, confirming the expediency of switching from a flat- two-dimensional form of displaying meteorological navigation information in a pseudo-three-dimensional or three-dimensional form with visualization of additional layers obtained for the current position of the aircraft from vector terrain maps. The performance requirements of the processor implementing secondary processing of radar data before their potential output on the indicator are estimated. The results of the work can be used in meteorological navigation onboard pulse-Doppler radars with optional image output for hybrid visualization.

**Keywords:** meteorological navigation, on-board radar, display, visualization

### References

- [1] Renato Morbidelli, "Rainfall: Modeling, Measurement and Applications," Elsevier, USA, 2022.
- [2] V. Chandrasekar, Robert M. Beauchamp, Renzo Bechini, "Weather Radar Introduction to Dual Polarization Weather Radar: Fundamentals, Applications, and Networks," Cambridge University Press, UK, 2023.
- [3] J. Yang, Z. Zhao, Q. Zhu, J. Han, Q. Zhang and S. Li, "The Impact of Raindrop Size Distributions on the Propagation Characteristics and Differential Parameters of X-Band Polarimetric Weather Radar," *2024 14th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, Hefei, China, 2024, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISAPE62431.2024.10840453.
- [4] Ran Y, Wang H, Tian L, "Precipitation cloud identification based on faster-RCNN for Doppler weather radar," *J Wireless Com Network*, 2021, vol. 19, pp.1-20.
- [5] Alexander V. Ryzhkov, Dusan S. Zrnica, "Radar Polarimetry for Weather Observations," Springer International Publishing, Germany, 2019.
- [6] Standard ARINC708A-3 (1999), Airborne Weather Radar with Forward Looking Windshear Detection Capability, ARINC, Cedar Rapids, Iowa, USA.
- [7] Standard RTCA DO-220. A.2016 (2016), Minimum Operational Performance Standards for Airborne Weather Radar Systems, RTCA, Washington, USA.
- [8] T.A. Bazlova., N.V. Bocharnikov, G.B. Brylev, S.V. Bukatich, A.G. Linev, "Radar meteorological information in air navigation," Saint Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2014, 363 p. (in Russian)
- [9] M. B. Ryzhikov, A. R. Bestugin, Y. A. Novikova, I. A. Kirshina, "Temporary automatic gain control in a weather radar when a signal is reflected from a standard thunderstorm cell or from an arctic layered-rain cloud," *Journal Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2023, vol. 28, no. 2, pp. 21-28. (in Russian).
- [10] M. B. Ryzhikov, "Requirements for On-Board Radar Antennas to Reduce False Detections of Arctic Clouds Due to the Presence of Reflections from the Earth's Surface," *2023 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/WECONF57201.2023.10148050.

- [11] M. B. Ryzhikov, "Investigation of Conditions for Reducing the Number of False Wind Shear Detections in the Onboard Ka-band Radar for Polar Latitudes," *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, St. Petersburg, Russian Federation, 2024, pp. 1-5, doi: 10.1109/WECONF61770.2024.10564603.
- [12] Haolin Wang, Xu Guan, Jiao Li, Yanbo Peng, Guoqiang Wang, Qingzhu Zhang, Tianshuai Li, Xinfeng Wang, Qingpeng Meng, Jiaqi Chen, Min Zhao, Qiao Wang, "Quantifying the pollution changes and meteorological dependence of airborne trace elements coupling source apportionment and machine learning," *Science of The Total Environment*, 2024, vol. 948, pp. 1-4.
- [13] David Ison, "Navigating Weather: A Pilot's Guide to Airborne and Datalink Weather Radar," *Aviation Supplies & Academics, Inc., USA*, 2021.
- [14] Lesheng Hua, Chen Ling, Rick Thomas, "Effects of delayed weather radar images on pilots' spatial awareness," *Applied Ergonomics*, Vol. 98, No. 103598, 2022, pp.1-7, doi: 10.1016/j.apergo.2021.103598.
- [15] David W. Hamilton, Fred H. Proctor and Nash'at N. Ahmad, "Flight Tests of the Turbulence Prediction and Warning System (TPAWS)," Report NASA TM-2012-217337, VA: NASA Langley Research Center Hampton, USA, 2012.
- [16] Ryzhikov M. B, "Development of a inclined patch antenna array with reduced number of elements for adjusting the amplitude-phase distribution for low-altitude weather radar navigation of UAVs in the Arctic," 2023, *T-Comm*, vol. 17, no.10, pp. 13-19. (in Russian).
- [17] Ryzhikov M.B, "Reducing the level of side lobes in the cluster microstrip antenna arrays of airborne weather radars for polar latitudes," *T-Comm*, 2024, vol. 18, no.11 pp. 22-29. (in Russian)
- [18] T. Uno, T. Uesaka, N. Nakamoto, T. Fukasawa, T. Takahashi, Y. Inasawa, T. Yamamoto, T. Koyanagi, I. Kakimoto, Y. Konishi, "Design of a Dual-Polarized Low Sidelobe Slotted Waveguide Antenna for C-Band Phased Array Weather Radar," *2022 IEEE International Symposium on Phased Array Systems & Technology (PAST)*, Waltham, MA, USA, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/PAST49659.2022.9975055.
- [19] R. D. Palmer, M. B. Yeary, D. Schwartzman, J. L. Salazar-Cerreno, C. Fulton, M. McCord, B. Cheong, D. Bodine, P. Kirstetter, H. H. Sigmarsson, T. -Y. Yu, D. Zrnic, R. Kelley, J. Meier, M. Herndon, "Horus - A Fully Digital Polarimetric Phased Array Radar for Next-Generation Weather Observations," *IEEE Transactions on Radar Systems*, vol. 1, pp. 96-117, 2023, doi: 10.1109/TRS.2023.3280033.
- [20] M.B. Ryzhikov, Yu.A. Novikova, I.A. Kirshina, V.G. Svanidze, "Energy ratios, types of probing signals and intra-period signal processing in airborne radars designed to build maps of the Arctic ground surface," *T-Comm*, 2024, vol. 18, no.6, pp. 29-37. (in Russian)
- [21] M.B. Ryzhikov, Yu.A. Novikova, V.G. Tereschenko, "Numerical simulation to test the wind shear detection mode in an on-board radar signal simulator," *Engineering journal of Don*, 2024, no.12, pp.1-16. (in Russian)

#### Information about authors:

**Maksim B. Ryzhikov**, Ph.D.(Tech.), Associate Professor, Department "Radio-engineering and Fiber-optic Complexes", Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

**Yuliana A. Novikova**, Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department "Physics", Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia