

8. *Mog T., Fomenko E.* Transient Responses for Three Dimensional Structures of Grounded Source Airborne EM (GRATEM) // AEM 2008, 5th International Conference on Airborne Electromagnetics. – Haikko Manor, Finland, 2008. – P. 06-04.
9. *Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Мойлайнен Е.В.* Низкочастотная индуктивная аэроэлектроразведочная система EM-4H // Записки Горного института. – 2009. – Т. 183. – С. 224–227.
10. *Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Мойлайнен Е.В.* Новая вертолетная электроразведочная система «Экватор» для метода АМПП // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2010. – № 02 (32). – С. 27-29.
11. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1978. – 831 с.
12. *Killean P.G.* Exploration Trends and Developments in 2009. / ed.: Werniuk G. – In co-op. with The Northern Miner, Toronto, Ontario, 2010. – 26 p.
13. *Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Вовенко Т.А.* Возможности вертолетной системы “Экватор”, реализующей метод переходных процессов // Материалы 5-й Всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли (ЭМЗ-11). Книга 2. – СПб., 2011. – С. 437-440.
14. *Мойлайнен Е.В., Кирплюк П.В., Мельников П.В.* Применение аэроэлектроразведочной системы «Экватор» в горных условиях Восточного Саяна // Материалы 5-й Всероссийской школы-семинара им. М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна по электромагнитным зондированиям Земли (ЭМЗ-11). Книга 2. – СПб., 2011. – С. 282-285.
15. *Трусов А.А.* Особенности современной аэроэлектроразведки // Разведка и охрана недр. – 2011. – № 7. – С. 31-36.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. М.Ю. Медведев.

Волковицкий Андрей Кириллович – Учреждение Российской Академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; e-mail: avolkovitsky@yandex.ru; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65; тел.: 84953349080; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; ведущий инженер.

Volkovitsky Andrey Kirillovich – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS; e-mail: avolkovitsky@yandex.ru; Russia, 65, Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; phone: +74953349080; the dynamic information-control systems laboratory; leading engineer.

Каршаков Евгений Владимирович – e-mail: karshak@mail.ru; тел.: 84953349080; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; с.н.с.; к.ф.-м.н.

Karshakov Evgeny Vladimirovich – e-mail: karshak@mail.ru; phone: +74953349080; the dynamic information-control systems laboratory; senior researcher; can. of phis.-math. sc.

Павлов Борис Викторович – e-mail: pavlov@ipu.ru; тел.: 84953349351; лаборатория динамических информационно-управляющих систем; гл.н.с.; д.т.н.

Pavlov Boris Viktorovich – e-mail: pavlov@ipu.ru; phone: +74953349351 the dynamic information-control systems laboratory; chief researcher; dr. of eng. sc.

УДК 004.94, 519.8, 537.86

Д.Д. Ступин

ВОЗМОЖНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ СИТУАЦИИ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ РЛС НАБЛЮДЕНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ И КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ БОЛЬШОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Рассмотрены возможные направления повышения информационно-энергетических параметров РЛС наблюдения баллистических и космических объектов (КО). Сформулированы задачи для РЛС этого класса с точки зрения распознавания нештатных ситуаций в зоне РЛС. Рассмотрены качественные признаки нештатных ситуаций в зоне действия РЛС и возможные количественные оценки их достоверности, необходимые для надежно

решения задачи распознавания ситуаций. Оцениваются возможности когерентных сигналов большой длительности (амплитудные или амплитудно-фазовые измерения) при решении задач оценки ситуации. Приведены результаты моделирования и натурных экспериментов, подтверждающие высокие информационные возможности когерентных сигналов. Когерентные сигналы; наблюдение за космическими объектами.

D.D. Stupin

RECOGNITION'S POSSIBILITIES OF SPACE OBJECTS OBSERVATION RADAR WITH THE AID OF LONG-TIME COHERENT SIGNALS

Directions of increase of information-energy parameters for observations of ballistic and space objects Radar are considered. Problems for Radar of this class from the point of view of recognition of extraordinary situations are formulated. Qualitative factors of extraordinary situations in Radar's zone and possible numerical estimations of their reliability for dependability of recognition problem are considered. Possibilities of the long-time coherent signals for the decision of the situation recognition problems (amplitude or amplitude-phase measurements) are estimated. The results of modeling and real experiments which confirms the high information possibilities of coherent signals are presented.

Coherent signals; space objects observation.

Возрастающая роль ближнего Космоса как арены потенциальных будущих конфликтов между ведущими державами ставит перед перспективными РЛС наблюдения баллистических и космических объектов целый ряд новых задач. Одной из важнейших является задача получения адекватной информации о целевой ситуации в ближнем Космосе. Эта задача складывается из следующих «подзадач»:

1. Обнаружение всех объектов, проходящих в зоне действия РЛС и оценка их параметров движения, включая выявление участков маневра на траектории.
2. Оценка некоординатных параметров наблюдаемых объектов: состав, ориентация, размер, форма, параметры собственного вращения.
3. Распознавание ситуаций, связанных с резким изменением координатных и/или некоординатных параметров объектов: маневр, изменение ориентации, изменение состава, изменение размеров и формы.
4. Формирование комплекса информационных признаков, описывающих складывающуюся ситуацию, и проведение общей оценки ситуации.

Первая задача в современных и разрабатываемых РЛС в целом решается (открытым остается вопрос об обнаружении маневра объекта, но здесь можно говорить об установлении факта маневра). Вторая задача решается только на качественном уровне в ряде действующих РЛС. Третья и четвертая задачи не решаются даже на уровне постановки.

Космические объекты отличаются габаритами, формами и особенностями конструкции, что вызывает значительные сложности их распознавания и оценки степени «нештатности» ситуации. Для решения задачи «вскрытия» ситуации в ближнем Космосе необходим анализ информационных признаков объектов, к важнейшим из которых можно отнести [1]:

- ◆ качественный состав объекта (одиночный – многоэлементный);
- ◆ количественный состав объекта (число многоэлементных объектов, количество элементов в составе каждого объекта);
- ◆ вращение одиночных объектов (медленное, быстрое, стабилизация вращением и т.д.);
- ◆ изменение ориентации объекта по отношению к Земле;
- ◆ изменение состава, размеров, формы;
- ◆ наличие небаллистического участка траектории.

Возможные признаки нештатных ситуаций и критерии качества оценки этих признаков сведены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии качества оценки признаков нештатных ситуаций

Информационный признак	Оцениваемые параметры	Показатель качества оценки	Возможный вывод по оценке ситуации
Качественный состав объекта	«Одиночный - многоэлементный»	Достоверность > 0.9	Потенциально опасный объект
Количественный состав объекта	Число элементов	Достоверность > 0.7	Потенциально опасный объект/нештатная ситуация
Вращение объекта	Факт вращения	Достоверность > 0.9	Потенциально опасный объект
Изменение ориентации	Факт изменения	Достоверность > 0.9	Нештатная ситуация / потенциально опасный объект
Изменение состава, размеров, формы	Факт изменения	Достоверность > 0.9	Нештатная ситуация
Маневр на траектории	Факт маневра	Достоверность > 0.9	Нештатная ситуация / потенциально опасный объект

Очевидно, что представленные в табл. 1 данные носят преимущественно качественный характер, поэтому по мере развития технологий получения этих данных с помощью РЛС эти показатели будут модифицироваться и по своему составу, и по значениям. Принципиальным является тот факт, что сегодня эти признаки не формируются в действующих РЛС наблюдения космических объектов. Поэтому информационные возможности РЛС сегодня не позволяют получить некоординатные характеристики наблюдаемых объектов и сравнить их с «эталонными» параметрами объектов, определяющими опасность самих этих объектов и степень «нештатности» ситуации в зоне действия РЛС. Другими словами, информационные возможности современных РЛС не вполне адекватны «вызовам», характерным для сегодняшней ситуации в ближнем Космосе.

Рассматривая вопрос об информационных возможностях РЛС, необходимо начать с проблемы их предельных возможностей, или «информационного потенциала». Этот потенциал, как следует, например, из [2, 3], определяется тремя параметрами РЛС:

1. Частотная «полоса» сигналов F – определяет точность и разрешающую способность единичных измерений дальности.
2. Эквивалентная длительность сигналов T – определяет точности и разрешающие способности по производным дальности (радиальная скорость, радиальное ускорение и т.д.).
3. Пространственная «база» (эффективный размер апертуры приемной антенны) B – определяет точности и разрешающие способности по угловым координатам.

Совокупность этих параметров определяет некий «Параллелепипед информационных возможностей РЛС», изображенный на рис. 1.

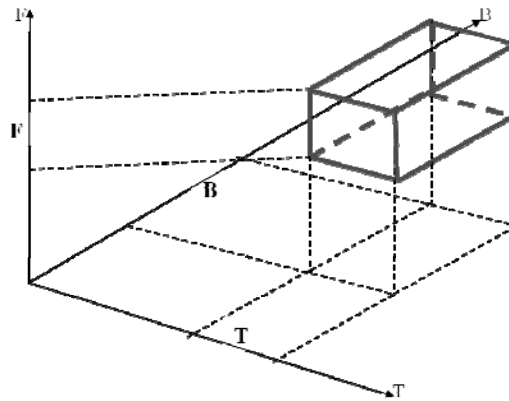


Рис. 1. «Параллелепипед информационных возможностей» РЛС

Высокие разрешающие способности и точности по производным дальности обеспечивают выделение целей на фоне различных мешающих отражений (в том числе отражения от других целей или пассивных помех) и разрешение элементов одиночных целей при наличии их относительного движения. Кроме того, увеличение длительности сигналов обеспечивает повышение энергетических возможностей РЛС. Это делает длительность сигнала и соответственно производные дальности наиболее перспективными параметрами для решения задач селекции целей и оценки ситуации. Таким образом, когерентные сигналы большой длительности являются значимым инструментом для решения этих задач.

Главным носителем информации о наблюдаемых объектах является, очевидно, отраженный сигнал, точнее, его трансформация по сравнению с зондирующим сигналом.

Зондирующий сигнал РЛС, как известно, имеет вид

$$S_3(t) = U_3(t)e^{j(\varphi_0 + \omega t)}, \quad (1)$$

где $U_3(t)$ – амплитуда зондирующего сигнала, φ_0 – начальная фаза, ω – несущая частота, t – текущее время.

Отраженный сигнал от объекта, составленного из M независимых отражателей (центров рассеяния), будет иметь M составляющих и представляется в виде

$$\begin{aligned} S_{omp}(t) &= \alpha(t)S_3(t - \tau(t)) = \\ &= \sum_{i=1}^M \alpha_i(t) \cdot U_{3i}(t - \tau(t)) \cdot e^{j(\varphi_0 + \omega(t - \tau(t)) + \varphi_{1i})}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $i = \overline{1, M}$; $\alpha(t)$ – амплитудный множитель; $\tau(t)$ – задержка по времени.

Каждая из составляющих отраженного сигнала зависит от фазового множителя $m_{\varphi i} = e^{j\omega(t_i - \tau_0)}$, значение которого определяется временным сдвигом $(t_i - \tau_0)$:

$$\begin{aligned} S_{ompi}(t) &= \alpha_i \cdot U_3(t_i - \tau_0) \cdot e^{j(\varphi_0 + \omega(t_i - \tau_0) + \varphi_{1i})} = \\ &= \alpha_i \cdot U_3(t_i - \tau_0) \cdot e^{j(\varphi_0 + \varphi_{1i})} m_{\varphi i}. \end{aligned} \quad (3)$$

Представим отраженный сигнал в виде произведений зондирующего сигнала, амплитудного α и фазового $e^{j\omega(t - \tau(t))}$ множителей

$$\begin{aligned}
 S_{omp}(t) &= \alpha S_3(t - \tau(t)) = \alpha \cdot U_3(t - \tau(t)) \cdot e^{j(\varphi_0 + \omega(t - \tau(t)) + \varphi_1)} = \\
 &= \alpha \cdot e^{j(\varphi_0 + \varphi_1)} \cdot U_3(t - \tau(t)) \cdot e^{j\omega(t - \tau(t))} = \alpha_1 \cdot U_3(t - \tau(t)) \cdot e^{j\omega(t - \tau(t))},
 \end{aligned} \quad (4)$$

где $\alpha_1 = \alpha \cdot e^{j(\varphi_0 + \varphi_1)}$.

Задержка по времени $\tau(t)$ зависит от дальности $R(t_0)$, скорости $\dot{R}(t_0)$, ускорения $\ddot{R}(t_0)$ объекта, а также от производных дальности более высоких порядков и в соответствии с рядом Тейлора может быть представлена в виде

$$\tau(t) = \frac{2R(t)}{c} = \frac{2}{c} [R(t_0) + \dot{R}(t_0) \cdot (t - t_0) + \ddot{R}(t_0) \cdot \frac{(t - t_0)^2}{2} \dots]. \quad (5)$$

С учетом задержки по времени преобразуем отраженный сигнал

$$\begin{aligned}
 S_{omp}(t) &= \alpha_1 \cdot U_3 \left[t - \frac{2}{c} \left[R(t_0) + \dot{R}(t_0) \cdot (t - t_0) + \ddot{R}(t_0) \cdot \frac{(t - t_0)^2}{2} \right] \right] \times \\
 &\times \exp \left\{ j\omega \left[t - \frac{2}{c} \left[R(t_0) + \dot{R}(t_0) \cdot (t - t_0) + \ddot{R}(t_0) \cdot \frac{(t - t_0)^2}{2} \right] \right] \right\}
 \end{aligned} \quad (6)$$

или

$$\begin{aligned}
 S_{omp}(t) &= \alpha_1 \cdot U_3(t - \tau(t)) \cdot e^{j\omega(t - \tau(t))} = \\
 &= \alpha_1 \cdot U_3 \left(t - \frac{2R(t)}{c} \right) \cdot \exp \left\{ j\omega \left(t - \frac{2R(t)}{c} \right) \right\}.
 \end{aligned} \quad (7)$$

Поскольку объект считаем совокупностью отдельных отражателей ($i = \overline{1, M}$), отраженный сигнал является суперпозицией сигналов от парциальных отражателей:

$$\begin{aligned}
 S_{ompi} &= \alpha_1 \cdot U_3(t - \tau_i(t)) \cdot \exp \left\{ j\omega(t - \tau_i(t)) \right\} = \\
 &= \alpha_1 \cdot U_3(t - \tau_i(t)) \cdot \exp(j\omega t) \cdot \exp(-j\omega \tau_i(t)),
 \end{aligned} \quad (8)$$

где $\tau_i(t) = \frac{2R_i(t)}{c}$.

Результирующий отраженный сигнал можно представить в виде суммы парциальных импульсов, отраженных от различных «блестящих» элементов объекта наблюдения, с учетом индивидуальных значений дальностей до них $R_i(t)$:

$$S_{ompi} = \alpha_1 \cdot U_3 \left(t - \frac{2R_i(t)}{c} \right) \cdot \exp(j\omega t) \cdot \exp \left(-j\omega \frac{2R_i(t)}{c} \right); \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 S_{omp}(t) &= \alpha_i \cdot \sum_{i=1}^M U_3 \left(t - \frac{2R_i(t)}{c} \right) \cdot \exp(j\omega t) \cdot \exp \left(-j\omega \frac{2R_i(t)}{c} \right) = \\
 &= \alpha_i \cdot \exp(j\omega t) \sum_{i=1}^M U_3 \left(t - \frac{2R_i(t)}{c} \right) \cdot \exp \left(-j\omega \frac{2R_i(t)}{c} \right).
 \end{aligned} \quad (10)$$

Сделаем следующие допущения, упрощающие понимание сути процесса. Пусть

$$R_i(t) = R_0(t) + r_i(t),$$

$$U_3(t) \approx const, \text{ для } \forall i.$$

С учетом того, что $\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$, получим:

$$\begin{aligned}
 S_{omp}(t) &= \alpha_i \cdot e^{j\omega t} \cdot U_3(t) \sum_{i=1}^M e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}(R_0(t)+r_i(t))} = \\
 &= \alpha_i \cdot U_3(t) \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda}t} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}R_0(t)} \cdot \sum_{i=1}^M e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}r_i(t)},
 \end{aligned} \tag{11}$$

где λ – длина волны отраженного сигнала, c – скорость света.

Модуль отраженного сигнала определяет амплитудную диаграмму рассеяния (ДР) цели:

$$S(t) = |S_{omp}(t)| = |\alpha_i| \cdot U_3(t) \cdot \left| \sum_{i=1}^M e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}r_i(t)} \right|. \tag{12}$$

Анализ выражения (12) показывает, что амплитудная диаграмма рассеяния цели имеет лепестковую структуру и флуктуирует во времени.

Изменения амплитудных измерений во времени – традиционный и потенциально весьма ёмкий источник информации. В частности, на основе анализа изменений амплитуды может быть получена следующая информация:

- ◆ оценка временной задержки и получение измерений дальности до объекта;
- ◆ наличие движения объекта относительно центра масс, параметры ориентации объекта в пространстве;
- ◆ наличие и параметры собственного вращения объекта (период вращения);
- ◆ оценка ЭПР и габаритных размеров объекта;
- ◆ наличие/отсутствие поляризационных эффектов (вращение плоскости поляризации, другие виды поляризационных замираний);
- ◆ качественная оценка состава объекта («один – не один»).

Опыт практической работы РЛС по наблюдению космических объектов показывает, что амплитудные измерения позволяют (по крайней мере, на качественном уровне) решать задачи селекции и оценки ситуации с высокой достоверностью.

Аргумент в выражении (11) представляет собой фазу отраженного сигнала, которая для случая наблюдения одиночного объекта однозначно связана с дальностью до этого объекта:

$$\varphi^{(n)}(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} R^{(n)}(t), \tag{13}$$

где n – порядок производной

Информация, получаемая на основе анализа фазы эхо-сигнала (оценки фазы сигнала и ее производных по времени с точностью до единиц градусов), позволяет оценить дальность и ее производные с точностью до долей длины волны. Чувствительность фазовой информации к изменениям положения отдельных отражательных элементов наблюдаемого объекта обеспечивает возможность «вскрытия» состава объекта, т.е. радиолокационного разрешения отдельных «отражателей» (элементы многоэлементной цели или элементы конструкции крупноразмерного объекта), меняющих свое взаимное положение на интервале длительности сигнала. Фаза эхо-сигнала, учитывая ее более высокую чувствительность к изменениям конфигурации и состава объекта, является более информативным параметром по сравнению с амплитудой. Высокая информативность фазовой информации для решения задач селекции объектов и оценки ситуации подтверждается результатами моделирования и натурных работ, качественно представленных на рис. 1–3.

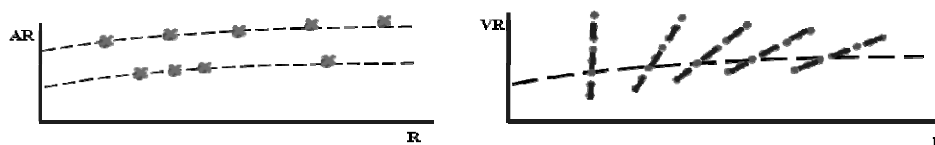


Рис. 2. Радиолокационные портреты (РЛП) многоэлементных объектов в координатах «дальность – радиальное ускорение» (2 объекта) и «дальность – радиальная скорость» (с разверткой по времени)

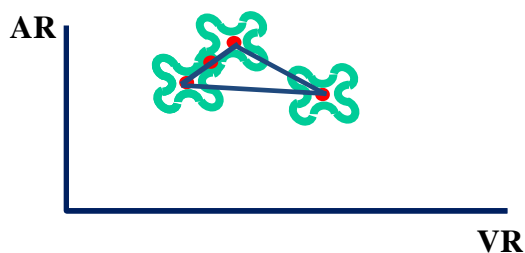


Рис. 3. РЛП одиночной вращающейся цели в координатах «радиальная скорость – радиальное ускорение»



Рис. 4. Обнаружение маневра цели

Таким образом, уникальные информационные возможности когерентных сигналов большой длительности, которые подтверждены результатами экспериментальных исследований и натурных работ на реальных РЛС [1, 4, 5], подтверждают и возможность достижения требуемых значений показателей качества при решении задач селекции космических объектов и распознавания угрожающих ситуаций в зоне действия РЛС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Боев С.Ф., Ступин Д.Д. Дальняя радиолокация: состояние, проблемы и перспективы // Труды 53-й научной конференции МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе». Радиотехника и кибернетика. Том 1. – М.: МФТИ 2010. – С. 4-9.
2. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
3. Информационные технологии в радиотехнических системах: Учеб. пособие / В.А. Васин, И.Б. Власов и др.: Под ред. И.Б. Федорова. – М.: Изд-во МГТУ им Баумана, 2003. – 671 с.

4. *Ступин Д.Д.* Дальняя радиолокация: состояние, проблемы и перспективы. Приоритет – сотрудничеству с МФТИ // Антенны. – 2011. – № 10. – С. 19-21.
5. *Зарецкий В.И., Ступин Д.Д.* Вопросы синтеза алгоритмов обнаружения маневра и оценивания параметров движения маневрирующих объектов/ / Сб. трудов 7-й Всероссийской молодежной научной школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение». – Саранск: Изд-во Мордовского государственного университета, 2008. – С. 190-191.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.А. Васильев.

Ступин Дмитрий Дмитриевич – Концерн «РТИ Системь», e-mail: stupin@rtisystems.ru; 127083, Москва, ул. 8 Марта, д. 10, стр. 1; тел.: 84956238348; заместитель генерального директора; к.т.н.; профессор.

Stupin Dmitry Dmitrievich – Concern “RTI Systems”; e-mail: stupin@rtisystems.ru; 10, bild 1, 8 Marta street, Moscow, 127083, Russia; phone: +74956238348; the deputy CEO for R&D; cand. of eng. sc.; professor.

УДК 004.932.4

**С.А. Бачило, Д.Ю. Дзягун, И.И. Итенберг, В.Д. Макогон,
А.Л. Марков, А.В. Рыбин**

ИНТЕГРИРОВАННАЯ АВИАЦИОННАЯ СИСТЕМА СИНТЕЗИРОВАННОГО И УЛУЧШЕННОГО ВИДЕНИЯ

Описывается технический облик ИАССУВ, реализуемой на основе быстродействующей платформы интегрированной модульной авионики. Проведен анализ характеристик изображений наземной обстановки, формируемых каналами технического зрения в условиях пониженной видимости в различных спектральных диапазонах, представлены алгоритмы улучшения характеристик и комплексирования изображений наземной обстановки, формируемых каналами технического зрения различных спектральных диапазонов. Проведен анализ особенностей формирования изображений наземной обстановки и рассмотрены базовые функции обработки изображений с целью улучшения видения.

Улучшение видения; комплексирование; ИМА; авиационные системы.

**S.A. Bachilo, D.Yu. Dzyagun, I.I. Itenberg, V.D. Makogon,
A.L. Markov, A.V. Rybin**

INTEGRATED AIRCRAFT SYNTHETIC AND ENHANCED VISION SYSTEM

The report describes the technical concept of Integrated Aircraft Synthetic and Enhanced Vision System implemented on the basis of high-performance Integrated Modular Avionics Platform. The analysis of characteristics of images of the ground conditions formed by channels of technical sight in conditions of lowered visibility in various spectral ranges is lead, algorithms of improvement of characteristics and комплексирования the images of ground conditions formed by channels of technical sight of various spectral ranges are presented. The analysis of features of formation of images of ground conditions is lead and base functions of processing of images with the purpose of improvement of vision are considered.

Vision enhancement; complexing; IMA; aircraft systems.

Введение. Эффективность применения и перспективы развития авиационных систем определяются возможностью выполнения безопасных полетов днем и ночью, в сложных и быстро изменяющихся метеорологических условиях, в условиях недостаточной видимости.

Традиционный подход к расширению условий выполнения безопасных полетов за счет совершенствования радиотехнических систем навигации и посадки как