

Оценка информативности радиолокационных изображений при их совмещении с цифровыми картами местности

Estimation of selfdescriptiveness of the radartracking images at their combination with digital district maps

Ключевые слова: радиолокационное изображение – radartracking image; цифровая карта местности – digital district map; повышение информативности – improvement of selfdescriptiveness; количественная оценка информативности – quantitative estimation of selfdescriptiveness; конечный пользователь – end user; метрика и семантика объектов местности – metric and semantics of the district landmarks; информационное множество – information set.

В статье предложен новый подход к количественной оценке информативности радиолокационных изображений и цифровых карт местности и эффективности их совмещения, базирующийся на определении количества информации, содержащейся в изображениях, с точки зрения конечного потребителя.

In article the new approach to a quantitative estimation of selfdescriptiveness of the radar images and digital maps and efficiency of their combination, based on definition of quantity of the information containing in images, from the point of view of the end user is offered.

Совмещение радиолокационных изображений (РЛИ) и цифровых карт местности (ЦКМ) на индикаторе бортовой радиолокационной станции (БРЛС) летательного аппарата в режиме реального времени позволяет существенно повысить информативность исходных РЛИ, а также решает многие проблемы идентификации радиолокационных объектов (РЛО) [1]. Однако задача количественной оценки информативности исходных изображений и эффективности их совмещения существенно усложняется, поскольку РЛИ и ЦКМ имеют физически различные принципы формирования и разные форматы представления.

ПЕТРОВ / PETROV Y.

Юрий Витальевич

(gar-vitalij@yandex.ru)
кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных систем управления Балтийского государственного технического университета («Военмех») им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

ГАРМАШ / GARMASH V.

Виталий Николаевич

(gar-vitalij@yandex.ru)
аспирант Балтийского государственного технического университета («Военмех») им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

Проведенный анализ показал, что существующие подходы к оценке информативности изображений в данном случае малопригодны вследствие их инвариантности относительно семантических свойств изображений либо недостаточной универсальности. Таким образом, для оценки эффективности совмещения РЛИ и ЦКМ необходим новый подход к определению информативности исходных изображений.

Полезность информации принято определять возможностью ее применения для достижения какой-либо цели [3]. В данном случае полезной является информация, способствующая повышению вероятности выполнения поставленной задачи. Поэтому следует иметь в виду, что повышение информативности РЛИ за счет ЦКМ возможно лишь в тех случаях, когда задача так или иначе связана с использованием данных об объектах местности. Например, информация, сосредоточенная в ЦКМ, может обладать высокой ценностью при идентификации обнаруженных объектов в режиме обзора земной поверхности, при маловысотном полете летательного аппарата в режиме следования рельефу,

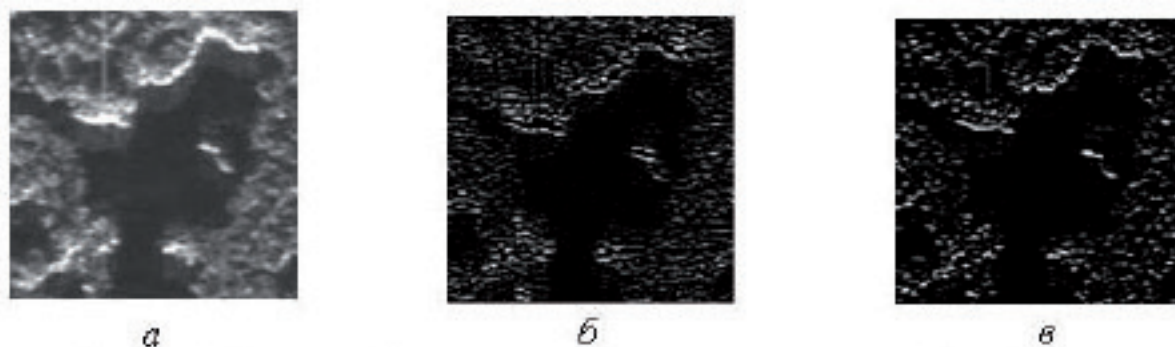


Рис. 1. Выделение объектов на радиолокационном изображении:
 а – исходное изображение; б – обработанное лапласианом;
 в – обработанное лапласианом гауссиана

при разведке и привязке к местности тактической обстановки и т.д.

В большинстве случаев для пилотируемых летательных аппаратов конечным потребителем радиолокационной информации является оператор БРЛС (человек). Его задачами являются визуальный выбор объекта на РЛИ и привязка к радиолокационной цели. Таким образом, с точки зрения совмещения РЛИ и ЦКМ необходимо производить количественную оценку информативности РЛИ не в техническом, а в гносеологическом смысле. Для этого необходимым является знание всей исходной (содержащейся в РЛИ) и вновь приобретаемой (в результате совмещения с ЦКМ) информации с точки зрения пользователя.

Гносеологией называется теория познания. В рассматриваемой ситуации субъектом познания выступает конкретный человек (оператор БРЛС), объектом познания – последовательность получаемых РЛИ, а средством познания – визуальная оценка, в процессе которой оператор производит идентификацию отдельных РЛО на фоне подстилающей поверхности. При этом решающее значение имеет не мощность отражения (уровни яркости элементов изображения), а его характер (объекты с устойчивыми характеристиками отражения) [2].

Можно выделить два вида информации о каждом РЛО: метрическую и семантическую. Источником первого вида информации является метрика взаимного расположения радиолокационно-контрастных целей, на основании которой оператор идентифицирует некое множество элементов РЛИ как отдельный объект. В этом смысле количество информации о каждом РЛО детерминировано числом составляющих его элементов РЛИ. Семантическая информация включает в себя данные об отношении РЛО к определенному классу и

данные о некоторых его характеристиках (как количественных, так и качественных), количество и состав которых определяются классом объекта. Исходя из формы РЛО и его среднего уровня яркости, оператор обычно может неоднозначно классифицировать объект, но отнести его к определенному подмножеству классов. Также по РЛИ возможно приблизительно определить некоторые характеристики РЛО (ширина дорог, материал покрытия и т.д.). Совокупность метрических и семантических данных об объектах РЛИ является исходной информацией для оператора БРЛС, на основании которой он принимает решение о выборе нужной цели.

Количество информации, содержащейся в одном символе алфавита, состоящего из q символов s_1, s_2, \dots, s_q с соответствующими вероятностями p_1, p_2, \dots, p_q , определяется [4]:

$$I(s_i) = \log_2(1/p_i). \quad (1)$$

С точки зрения оператора БРЛС, каждый пиксель РЛИ может либо входить в состав объекта с устойчивыми характеристиками отражения (событие s_1), либо являться частью неинформативного фона (событие s_2). При этом полезную информацию представляют лишь границы объектов, поскольку внутреннее пространство площадных РЛО будет являться, в свою очередь, фоном для более мелких подобъектов. Например, озеро на рис. 1, а, с одной стороны является объектом, контрастным на фоне леса, а с другой стороны – фоном при выделении островов.

Для определения априорных вероятностей p_1 и p_2 в классическом смысле потребовалась бы генерация всех возможных РЛИ заданных размеров и определение отношений количеств

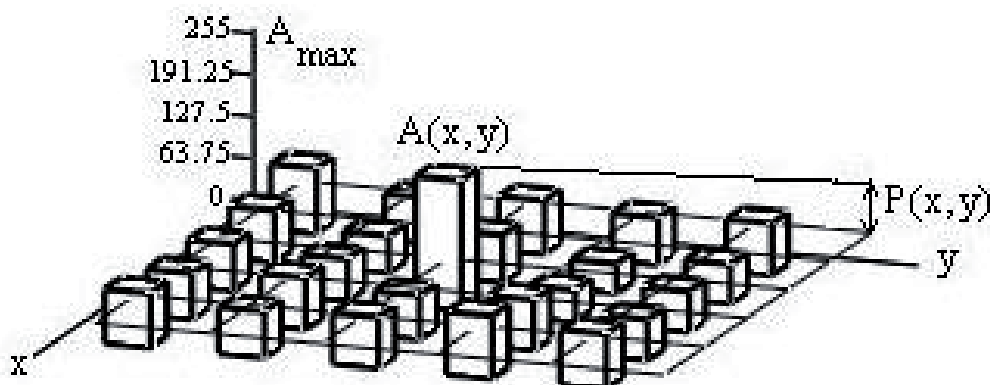


Рис. 2. Взаимосвязь величин, используемых для расчета количества информации в элементах радиолокационного изображения

элементов, входящих в состав РЛО и фона, к их общему числу; также возможна приблизительная оценка p_1 и p_2 значений по выборке. Допустим равную вероятность этих событий: $p_1 = p_2 = 1/2$. В этом случае при достоверной идентификации местоположения объектов на изображении количество информации, содержащейся в 1 пикселе, с точки зрения оператора будет соответствовать 1 биту. Данное утверждение справедливо для ЦКМ, поскольку метрика объектов в них задается однозначно. В случае РЛИ можно говорить лишь об отнесении элемента к тому или иному классу с некоторой вероятностью вследствие влияния шумов, понижающих информативность изображения. Количество информации, содержащейся в 1 пикселе РЛИ, предлагается оценивать следующим образом:

$$I_{\text{РЛИ}}(x, y) = \mu(x, y) \cdot \log_2 \left[1 + \left(\frac{P(x, y)}{A_{\text{max}}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

где A_{max} – максимальное значение яркости; $P(x, y)$ – контрастность контура РЛО на фоне подстилающей поверхности; $\mu(x, y)$ – весовые коэффициенты элементов РЛИ, значения которых определяются типом РЛО в зависимости от поставленной задачи (режима работы БРЛС).

На рисунке 2 отражена взаимосвязь величин, используемых в формуле (2) для расчета количества информации в элементах радиолокационного изображения. Отношение $P(x, y)/A_{\text{max}}$ здесь аналогично отношению «сигнал-шум» с учетом того фактора, что в рассматриваемом случае решающую роль играют не уровни полезного сигнала и шума, а контрастность объекта с устойчивыми

характеристиками отражения на фоне помехи. Очевидно, что при отсутствии шума и $A(x, y) = A_{\text{max}}$ в соответствии с выражением (2)

$$I_{\text{РЛИ}}(x, y) = I_{\text{ЦКМ}}(x, y) = 1,$$

т.е. 1 бит, что соответствует достоверной идентификации местоположения объекта.

Получение функции контрастности $P(x, y)$ по функции яркости исходного РЛИ $A(x, y)$ описывается выражением:

$$P(x, y) = F\{A(x, y)\}, \quad (3)$$

где $F\{K\}$ – оператор преобразования.

Поскольку полезную информацию представляют границы РЛО, необходимым является соответствие данного оператора следующим требованиям:

- 1) подавление фона РЛИ;
- 2) выделение и локализация краев РЛО с устойчивыми характеристиками отражения;
- 3) использование для выделения границ ненаправленных операторов вследствие произвольной ориентации объектов на РЛИ;
- 4) отсутствие эффекта «раздвоения» границ при обработке утолщенных линейных РЛО, поскольку данный эффект приводит к преобразованию типа локализации объекта в площадной, что ведет к трудностям при совмещении с ЦКМ (рис. 1, б);
- 5) возможность реализации в реальном времени с целью применения алгоритма в составе бортовой геоинформационной системы.

Всем вышеперечисленным требованиям удовлетворяет оператор лапласиана, совмещенный со сглаживающей гауссовой функцией [5]. Аппроксимирующая маска для получения

СВЯЗЬ

свертки изображения с лапласианом гауссиана имеет следующий вид:

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ -1 & -2 & 16 & -2 & -1 \\ 0 & -1 & -2 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Лапласиан двумерной функции $A(x,y)$ представляет собой производную второго порядка. Так как взятие второй производной – операция линейная, свертка изображения с этой маской эквивалентна тому, как если бы изображение сначала сворачивалось с гауссовой сглаживающей функцией, а потом вычислялся лапласиан результата. Целью гауссовой функции является сглаживание изображения, а целью лапласиана – нахождение на изображении точек пересечения нулевого уровня, используемых для локализации контуров. Сглаживание изображения снижает влияние шума и противостоит повышенной шумовой чувствительности вторых производных в составе лапласиана. Поскольку воздействие обоих операторов совмещено в одной аппроксимирующей маске, получение функции $P(x,y)$ осуществляется в один проход по исходному изображению $A(x,y)$, что в 2 раза увеличивает быстродействие алгоритма по сравнению с широко используемым способом, когда обработка РЛИ осуществляется в два этапа (фильтрация и сегментация), и соответственно, в два прохода аппроксимирующих масок. Результат обработки РЛИ с рис. 1, а, лапласианом гауссиана представлен на рис. 1, в.

Произведем оценку метрической информативности РЛИ в терминах теории множеств. Пусть R_i – множество элементов (пикселей) исходного РЛИ, идентифицируемых как некий отдельный объект местности i , а M_i – множество элементов, соответствующих растровому представлению данного объекта в ЦКМ в системе координат РЛИ. Мощности этих множеств находятся как взвешенные суммы всех составляющих элементов с весами, равными количеству информации, содержащейся в данных элементах:

$$\begin{cases} |R_i| = \sum_{x,y} I_{РЛИ}(x,y) \\ |M_i| = \sum_{x,y} I_{ЦКМ}(x,y) \end{cases} \quad (4)$$

При объединении информативных множеств $M_i \cup R_i$:

$$I_{\cup}(x,y) = \max(I_{РЛИ}(x,y), I_{ЦКМ}(x,y)). \quad (5)$$

При нахождении разности множеств $M_i \setminus R_i$:

$$I_{\setminus}(x,y) = \begin{cases} I_{ЦКМ}(x,y) - I_{РЛИ}(x,y); \\ \text{при } I_{ЦКМ}(x,y) > I_{РЛИ}(x,y) \\ 0; \\ \text{при } I_{РЛИ}(x,y) > I_{ЦКМ}(x,y) \end{cases} \quad (6)$$

Исходную метрическую информативность объекта i можно выразить как отношение мощности множества R_i к времени формирования кадра РЛИ t_k :

$$I_i^M = \frac{|R_i|}{t_k} \quad (7)$$

При совмещении РЛИ и ЦКМ информативность возрастает:

$$I_i^M = \frac{|R_i \cup M_i|}{t_k} \quad (8)$$

Абсолютный прирост информативности, полученный за счет совмещения, равен:

$$\Delta I_i^M = \frac{|R_i \cup M_i| - |R_i|}{t_k} = \frac{|M_i \setminus R_i|}{t_k} \quad (9)$$

Относительный прирост информативности объекта i :

$$dI_i^M = \frac{|M_i \setminus R_i|}{|R_i \cup M_i|} \cdot 100\% \quad (10)$$

Средний относительный прирост информативности объектов РЛИ можно оценить как:

$$\overline{dI_i^M} = \frac{\sum_{i=1}^N dI_i}{N} \quad (11)$$

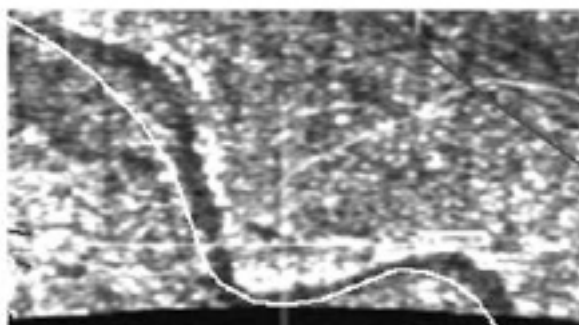


Рис. 3. Несоответствие точности цифровой карты и разрешения радиолокатора

где N – количество объектов композитного изображения.

Просуммировав по i (9) и (10), получим, соответственно, абсолютное и относительное повышение метрической информативности всего РЛИ:

$$\Delta I^M = \frac{\sum_{i=1}^N |M_i \setminus R_i|}{t_K}, \quad (12)$$

$$dI^M = \frac{\sum_{i=1}^N |M_i \setminus R_i|}{\sum_{i=1}^N |R_i \cup M_i|} \cdot 100\%. \quad (13)$$

Следует иметь в виду, что для корректной оценки ранее описанных видов прироста метрической информативности РЛИ необходимым условием является соответствие точности используемых ЦКМ и разрешающей способности БРЛС. В случае если точность карты хуже разрешения БРЛС, нарушается соответствие формы и характера локализации объектов местности на РЛИ и ЦКМ. На рисунке 3 приведен пример совмещения РЛИ с разрешением 5 м и ЦКМ с точностью 20 м.

В обратной ситуации, когда точность карты превосходит разрешающую способность БРЛС, излишняя подробность ЦКМ приводит к перенасыщению композитного изображения. В случае БРЛС с регулируемой разрешающей способностью рекомендуется использование карт разной точности для различных режимов обзора. В настоящее время широко распространены ЦКМ точностей 5, 10, 20, 50 и 100 м (масштабов 1:50000, 1:100000, 1:200000, 1:500000 и 1:1000000, соответственно).

Ранее описанный подход применим и для оценки прироста семантического вида информативности:

$$\Delta I^C = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i^M - I_i^R)}{t_K}, \quad (14)$$

$$dI^C = \frac{\sum_{i=1}^N (I_i^M - I_i^R)}{\sum_{i=1}^N I_i^M} \cdot 100\%. \quad (15)$$

Отличие состоит в том, что в этом случае вместо R_i и M_i используется количество информации о классе и характеристиках РЛО, содержащейся в РЛИ (I_i^R) и сосредоточенной в ЦКМ (I_i^M). Процесс их расчета заключается в следующем. Для каждой j -й определяемой характеристики объекта по классификатору семантики ЦКМ определяется множество значений K_{ij} , которые, в принципе, может принимать данная характеристика (априори с равной степенью вероятности). Информация I_i^R , содержащаяся в РЛИ, обычно позволяет определить не точное значение характеристики j , а лишь подмножество $C_{ij} \subset K_{ij}$, к которому может относиться это значение. Подставив имеющиеся данные в (2), получим:

$$I_i^R = \sum_{j=1}^L \log_2 \frac{|K_{ij}|}{|C_{ij}|}, \quad (16)$$

где L – общее число определяемых характеристик объекта. В отличие от РЛИ, в ЦКМ содержатся точные значения этих характеристик, поэтому:

$$I_i^M = \sum_{j=1}^L \log_2 |K_{ij}|. \quad (17)$$

Затем по формулам (14) и (15) рассчитывается абсолютное и относительное увеличение семантической информативности.

Рисунок 4 иллюстрирует предложенный метод оценки прироста информативности. Из исходного РЛИ (рис. 4, а) выделяется множество R_i пикселей, описывающих некий РЛО: в данном случае дорогу (рис. 4, б). Множеству M_i соответствует растровое изображение этого же объекта, полученное из



Рис. 4. Определение множеств R_i , M_i , $R_i \cup M_i$ и $M_i \setminus R_i$ для радиолокационного объекта: а – исходное изображение; б – R_i ; в – M_i ; г – $R_i \cup M_i$; д – $M_i \setminus R_i$

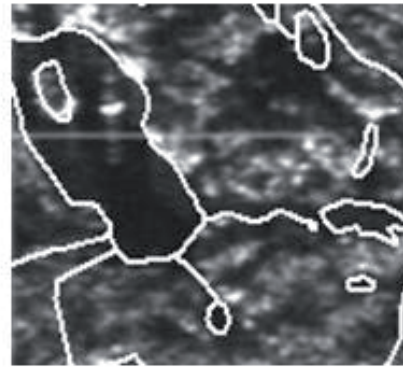


Рис. 5. Совмещенное с цифровой картой радиолокационное изображение

ЦКМ путем совмещения в одинаковой системе координат (рис. 4, в). По совмещенному изображению определяются множества $R_i \cup M_i$ (рис. 4, г), $M_i \setminus R_i$ (рис. 4, д) и их мощности, которые для данного примера составили, соответственно, 293 и 68. Таким образом, относительный прирост метрической информативности за счет использования ЦКМ для РЛО с рис. 4 равен 23%. По форме изображения на РЛИ из всего множества возможных 1236 классов объект можно отнести к подмножеству «дорожные сети», содержащему 38 классов: по формуле (16) находим $I_i^R \approx 5$ бит. В цифровых картах местности содержится точная информация о классе РЛО: «полевые и лесные дороги» – согласно (17), $I_i^M \approx 10$ бит. Относительное повышение семантической информативности объекта составило 50%.

На рисунке 5 представлено совмещенное изображение РЛИ и ЦКМ, содержащее $N=15$ объектов местности. Некоторые из них достаточно хорошо различимы на фоне подстилающей поверхности (большое озеро и остров), другие, напротив, не видны на РЛИ и их идентификация возможна только при использовании ЦКМ. Средний относительный прирост информативности РЛО для данного изображения, согласно (11), составил 68%, а относительное повышение метрической информативности всего РЛИ в соответствии с (13) – 42%.

Таким образом, предложен новый подход к количественной оценке информативности РЛИ и ЦКМ и эффективности их совмещения, базирующийся на гносеологическом определении количества информации с точки зрения конечного потребителя. Данный подход позволяет оценивать не некие технические характеристики изображений, влияющие на их качество в целом, а «семанти-

ческие», содержательные свойства. Кроме того, подход является достаточно универсальным и может быть использован для оценки информативности объектов любой формы и типа локализации.

Реализация предложенных алгоритмов расчета информативности изображений в составе бортовой геоинформационной системы летательного аппарата открывает возможность формирования совмещенных изображений не посредством простого наложения, а путем составления композитного изображения из наиболее информативных по критерию (2) участков РЛИ либо ЦКМ. Следует отметить, что для эффективной оценки информативности РЛО предложенным методом абсолютная ошибка совмещения РЛИ и ЦКМ не должна превышать величину, равную разрешающей способности БРЛС, что обеспечит их корректное наложение.

Литература

1. Гармаш В.Н. Использование геопространственной информации в бортовых радиолокационных комплексах // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций (РТ-2009): Мат-лы 5-й Междунар. молодежн. научн.-техн. конф. / Севастопольский нац. техн. ун-т. – Севастополь: Вебер, 2009.
2. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Радиотехника, 2005.
3. Корогодина В.И., Корогодина В.Л. Информация как основа жизни. – Дубна: Феникс, 2000.
4. Хэмминг Р.В. Теория кодирования и теория информации. – М.: Радио и связь, 1983.
5. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing. – Prentice-Hall, 2002.