

УДК 621.396

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПОСОБОВ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ ВИДОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

© С. М. Огреб, П. М. Юхно

*Государственный научно-исследовательский испытательный институт
проблем технической защиты информации Федеральной службы
по техническому и экспортному контролю России,
394030, г. Воронеж, ул. Студенческая, 36
E-mail: jukhnopr@mail.ru*

Рассматривается задача обнаружения пространственных объектов по видовой информации (по изображениям), доставляемой двумя или тремя различными датчиками. Дана сравнительная оценка характеристик обнаружения объекта с использованием алгоритмов комбинирования и комплексирования информации от различных датчиков, а также путём формирования единого синтетического изображения из двух исходных. Определены условия, при которых применение как алгоритма комбинирования информации, так и способа формирования единого синтетического изображения проигрывает в эффективности случаю использования для обнаружения только одного изображения из всех имеющихся.

Ключевые слова: изображение объекта, вероятность обнаружения, совместная обработка, комплексирование информации, комбинирование информации, синтетическое изображение.

DOI: 10.15372/AUT20190412

Введение. В последнее время всё более широкое применение в различных областях науки и техники находят многоканальные устройства получения видовой информации. В отдельных каналах таких устройств могут использоваться оптические и радиолокационные датчики, формирующие яркостное изображение объекта интереса в нескольких спектральных диапазонах. Для получения изображений также применяются датчики, формирующие трёхмерное изображение, доплеровский портрет объекта или его портрет в других физических полях. В связи с этим актуализируется задача повышения эффективности решений, принимаемых на основе использования способов обработки видовой информации (изображений), добываемой совокупностью различных датчиков. Способам и средствам совместной обработки информации посвящено большое количество работ, например [1–3]. Однако сравнительной оценке эффективности разных способов такой обработки уделяется недостаточно внимания. Так, способы, основанные на синтезе единого изображения из всех имеющихся, рассматриваются, как правило, в рамках эвристического подхода, что затрудняет получение надёжных данных о возможностях такой обработки.

Целью предлагаемого исследования является выполнение сравнительного анализа эффективности разных способов совместной обработки видовой информации при обнаружении пространственных объектов по их изображениям, доставляемым датчиками, использующими сигналы различной физической природы.

В качестве одного из способов совместной обработки обычно рассматривается обработка на уровне первичных данных (исходных изображений фоноцелевой обстановки), при этом единое информационное решение формируется по результатам совместной обработки всех имеющихся изображений. Такой способ условимся называть комплексированием информации. В основе второго способа лежит формирование итогового решения как некоторой комбинации частных решений, получаемых отдельно от каждого из имеющихся датчиков, поэтому будем называть такой способ комбинированием информации. В качестве

третьего рассмотрим способ, основанный на формировании единого изображения, синтезированного из совокупности исходных, и последующей его обработке, направленной на получение итогового информационного решения.

Расчётные соотношения. Итак, пусть имеется J датчиков формирования изображений ($j = 1, \dots, J$); $s_j(\mathbf{x})$ — изображение пространственного объекта (сигнал), формируемое j -м датчиком; $p_j(\mathbf{x})$ — изображение фона; $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ — вектор пространственных координат в плоскости формирования изображений. Пусть измерениям сопутствует аддитивный пространственный белый шум $n_j(\mathbf{x})$ со спектральной плотностью N_j в каждом j -м датчике. Полагаем $s_j(\mathbf{x})$ и $p_j(\mathbf{x})$ известными, тогда задача синтеза алгоритма комплексирования информации при обнаружении пространственного объекта, образующего аппликативную смесь с фоном, сводится к задаче синтеза решающего правила различения двух гипотез H_1 и H_0 :

$$H_1: \quad u_j(\mathbf{x}) = s_j(\mathbf{x}) + n_j(\mathbf{x}), \quad j = (1, \dots, J),$$

$$H_0: \quad u_j(\mathbf{x}) = p_j(\mathbf{x}) + n_j(\mathbf{x}), \quad j = (1, \dots, J).$$

Обозначим символами L_j область существования изображения объекта, сформированного j -м датчиком. Повторив выкладки, приведённые в [1], с учётом того, что спектральная плотность белого шума так же, как и область существования изображения объекта может изменяться от датчика к датчику, нетрудно показать, что при использовании критерия Неймана — Пирсона оптимальное решающее правило различения гипотез системой датчиков принимает вид

$$\sum_{j=1}^J \frac{1}{N_j} \int_{L_j} u_j(\mathbf{x})(s_j(\mathbf{x}) - p_j(\mathbf{x})) d\mathbf{x} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \eta, \quad (1)$$

где η — порог обнаружения, задающий уровень ложных тревог. При этом отношение сигнал/шум для системы датчиков (q) и для некоторого j -го датчика (q_j) описывается выражениями, аналогичными полученным в [1]:

$$q = \left(\sum_{j=1}^J \frac{1}{N_j} \int_{L_j} (s_j(\mathbf{x}) - p_j(\mathbf{x}))^2 d\mathbf{x} \right)^{1/2} = \left(\sum_{j=1}^J q_j^2 \right)^{1/2}; \quad (2)$$

$$q_j = \left(\frac{1}{N_j} \int_{L_j} (s_j(\mathbf{x}) - p_j(\mathbf{x}))^2 d\mathbf{x} \right)^{1/2}.$$

Использование матричных фотоприёмных устройств и цифровых методов обработки изображений определяет целесообразность представления выражения (2) в дискретном варианте:

$$q = \left(\sum_{j=1}^J \frac{1}{d_j^2} \sum_{m=1}^{M_j} \sum_{n=1}^{N_j} (s_{jmn} - p_{jmn})^2 \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Это выражение выводится из (2) с учётом того, что дисперсия d^2 отсчётов шума матричного фотоприёмника, соответствующая спектральной плотности пространственного

белого шума N , должна задаваться выражением $d^2 = N/\Delta_{x1}\Delta_{x2}$, где Δ_{x1} , Δ_{x2} — линейные размеры элемента разрешения определённого датчика. В (3) M_j , N_j — количество строк и столбцов в изображении, сформированном j -м датчиком; s_{jmn} — сигнал объекта на выходе mn -го элемента матрицы j -го датчика; p_{jmn} — сигнал фона на выходе того же элемента. Выражение (3) показывает, что использование алгоритма комплексирования информации от различных датчиков не требует приведения формируемых этими датчиками изображений к общему формату. Теперь вероятности правильного обнаружения p_r и ложной тревоги p_f , соответствующие порогу обнаружения η , определяются выражениями

$$p_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\eta}^{\infty} e^{-x^2/2} dx = \frac{1 - \Phi(\eta)}{2}; \quad p_r = \frac{1 - \Phi(\eta - q)}{2}, \quad (4)$$

где $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$.

Переходя к способам совместной обработки на основе комбинирования информации различных датчиков, рассмотрим сначала случай двух датчиков. Пусть p_{rj} , p_{fj} — вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги j -го датчика; p_r , p_f — такие же вероятности для системы датчиков. Рассмотрим далее две возможные логики принятия общего решения на основе некоторого комбинирования отдельных решений, формируемых независимо каждым датчиком.

1) Решение об обнаружении объекта принимается, если объект обнаружен хотя бы одним из двух имеющихся датчиков (правило «1 из 2»). Тогда

$$p_r = p_{r1} + (1 - p_{r1})p_{r2} = p_{r1} + p_{r2} - p_{r1}p_{r2};$$

$$p_f = p_{f1} + (1 - p_{f1})p_{f2} = p_{f1} + p_{f2} - p_{f1}p_{f2}. \quad (5)$$

2) Решение об обнаружении объекта принимается, если объект обнаружен каждым из двух имеющихся датчиков (правило «2 из 2»). Тогда

$$p_r = p_{r1}p_{r2}; \quad p_f = p_{f1}p_{f2}. \quad (6)$$

Далее рассмотрим случай наличия трёх датчиков информации.

1) Правило «1 из 3»:

$$p_r = 1 - (1 - p_{r1})(1 - p_{r2})(1 - p_{r3}) = p_{r1} + p_{r2} + p_{r3} - p_{r1}p_{r2} - p_{r1}p_{r3} - p_{r2}p_{r3} + p_{r1}p_{r2}p_{r3};$$

$$p_f = p_{f1} + p_{f2} + p_{f3} - p_{f1}p_{f2} - p_{f1}p_{f3} - p_{f2}p_{f3} + p_{f1}p_{f2}p_{f3}. \quad (7)$$

2) Правило «2 из 3»:

$$p_r = (1 - p_{r1})p_{r2}p_{r3} + (1 - p_{r2})p_{r1}p_{r3} + (1 - p_{r3})p_{r1}p_{r2} + p_{r1}p_{r2}p_{r3} =$$

$$= p_{r1}p_{r2} + p_{r1}p_{r3} + p_{r2}p_{r3} - 2p_{r1}p_{r2}p_{r3}; \quad (8)$$

$$p_f = p_{f1}p_{f2} + p_{f1}p_{f3} + p_{f2}p_{f3} - 2p_{f1}p_{f2}p_{f3}.$$

3) Правило «3 из 3»:

$$p_r = p_{r1}p_{r2}p_{r3}; \quad p_f = p_{f1}p_{f2}p_{f3}. \quad (9)$$

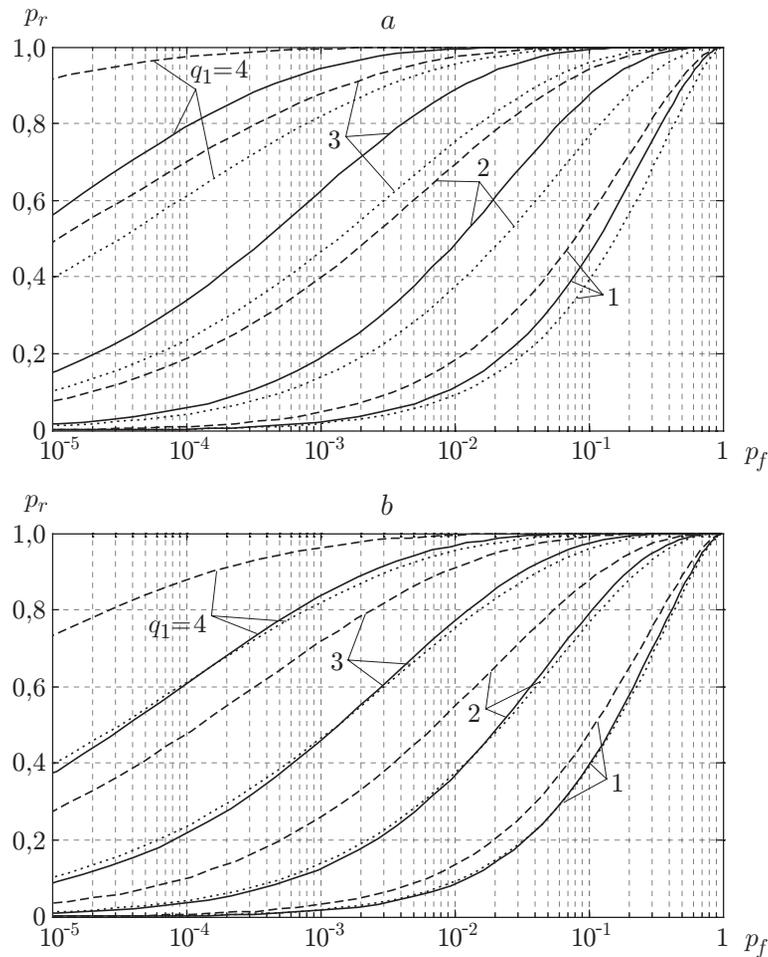


Рис. 1. Рабочие характеристики системы: из двух равноточных (а) и двух неравноточных (b) датчиков

Эффективность способов совместной обработки информации. Рассмотрим сначала равноточное формирование изображений каждым из двух датчиков, когда отношение сигнал/шум в этих датчиках удовлетворяет равенству $q_2 = q_1$, из которого следует, что $p_{r2} = p_{r1}$, $p_{f2} = p_{f1}$. Тогда для правила принятия решений «1 из 2» в (5) следует, что

$$p_r = 2p_{r1} - p_{r1}^2; \quad p_f = 2p_{f1} - p_{f1}^2. \quad (10)$$

На рис. 1, а сплошными кривыми отмечены рассчитанные с помощью выражений (4), (10) для различных значений q_1 рабочие характеристики, т. е. характеристики обнаружения системы из двух датчиков в виде зависимости p_r от p_f , пробегающей показанные на рисунке значения при изменении порога обнаружения η . Пунктирными кривыми показаны характеристики обнаружения только одного датчика.

При комплексировании информации от двух датчиков, предполагающем совместную обработку в соответствии с (1), выражение для отношения сигнал/шум системы из двух датчиков следует из (4):

$$q = q_1 \sqrt{2}. \quad (11)$$

Соответствующие (11) кривые обозначены на рис. 1, *a* штриховыми кривыми. Графики подтверждают заметно более высокую эффективность обнаружения пространственных объектов при использовании способа комплексирования информации по отношению к её комбинированию путём применения правил типа «*n* из *m*».

В общем случае равенство отношений сигнал/шум в датчиках не имеет места ($q_1 \neq q_2$). Пусть q_1 — отношение сигнал/шум в датчике, в котором оно больше, чем в другом. Пусть также $q_2 = kq_1$, причём $0 < k \leq 1$. Тогда $q = \sqrt{(1 + k^2)} q_1$. Вполне очевидно, что с уменьшением k снижается при прочих равных условиях и вероятность обнаружения объекта системой из двух датчиков. Это подтверждают кривые на рис. 1, *b*, аналогичные кривым на рис. 1, *a*, но построенные для $k = 0,7$.

Однако при дальнейшем уменьшении во втором датчике отношения сигнал/шум q_2 проявляется парадоксальная закономерность, состоящая в том, что при $k < 0,7$ характеристики обнаружения объекта отдельным датчиком с максимальным отношением сигнал/шум начинают превосходить характеристики обнаружения объекта системой датчиков в случае использования алгоритмов комбинирования информации типа «*n* из *m*». При этом более высокая эффективность алгоритма комплексирования информации сохраняется.

Такое на первый взгляд необычное поведение характеристик обнаружения обусловлено тем, что при использовании алгоритмов комбинирования существенно увеличивается вероятность ложной тревоги системы датчиков, которая и приводит к соответствующему смещению характеристик обнаружения объекта системой датчиков вправо. При $k = 0,7$ характеристики обнаружения объекта системой датчиков при комбинировании информации практически совпадают с характеристиками обнаружения объекта отдельным датчиком, что иллюстрируют графики (см. рис. 1, *b*).

При использовании правила «2 из 2» изменится только поведение кривых, относящихся к случаю комбинирования информации. Причём для этого правила сплошные кривые пройдут выше таких же кривых, соответствующих правилу «1 из 2», и приблизятся к кривым, построенным для случая комплексирования информации (рис. 1, *a*, *b*, штриховые кривые).

Аналогично правилу «1 из 2» при использовании правила «2 из 2» характеристики обнаружения объекта системой неравноточных датчиков превышают характеристики обнаружения одного датчика только тогда, когда коэффициент k , характеризующий разброс значений отношения сигнал/шум в имеющихся датчиках, удовлетворяет неравенству $0,65 < k < 1$. Таким образом, применение алгоритмов комбинирования информации двух датчиков может улучшить характеристики обнаружения по сравнению с характеристиками отдельного датчика, только когда значения отношения сигнал/шум в каждом из датчиков отличаются незначительно.

Рассмотрим случай использования в системе обнаружения трёх датчиков. Кривые обнаружения для правила «1 из 3» приведены на рис. 2, *a*, они построены при равенстве отношений сигнал/шум во всех трёх датчиках обнаружителя ($q_1 = q_2 = q_3$). На этом рисунке кривую вероятности обнаружения объекта при комплексировании информации и $q_1 = 4$ не удаётся заметно прорисовать, поскольку она близка к единице для всех фигурирующих на графике вероятностей ложных тревог.

Рассмотрим далее влияние неравенства значений отношения сигнал/шум на эффективность работы трёхканального обнаружителя.

Итак, пусть $q_2 = kq_1$, $q_3 = kq_1$. Графики (рис. 2, *b*), построенные для $k = 0,7$, иллюстрируют случай, когда при уменьшении k характеристики обнаружения объекта системой из трёх датчиков становятся весьма близки к характеристикам обнаружения только

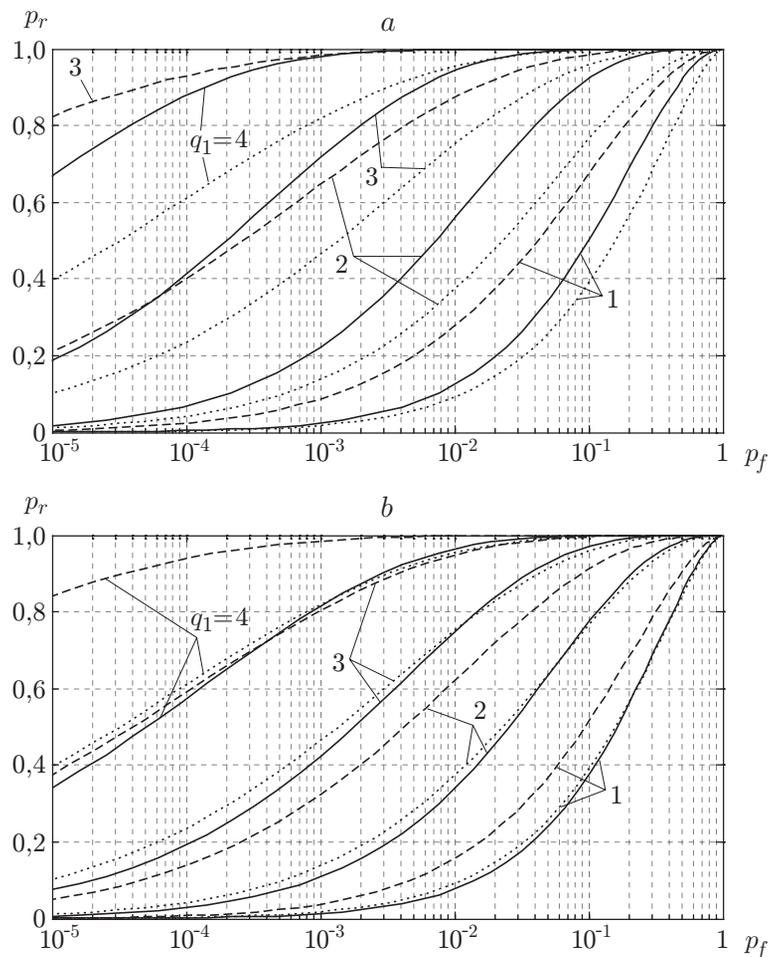


Рис. 2. Рабочие характеристики системы: из трёх равноточных (а) и трёх неравноточных (b) датчиков

одним датчиком. При дальнейшем уменьшении значений k характеристики обнаружения объекта системой трёх датчиков по правилу «1 из 3» проходят ниже характеристик обнаружения объекта только одним датчиком.

Не останавливаясь далее на детальном рассмотрении кривых, аналогичных приведённым на рис. 2, а, b и соответствующих правилам обнаружения «2 из 3» и «3 из 3», отметим следующие общие закономерности:

- качественные закономерности обнаружения объекта системой из трёх датчиков аналогичны закономерностям обнаружения объекта системой из двух датчиков;

- во всех случаях характеристики обнаружения объекта при использовании алгоритмов комплексирования информации существенно превышают такие же характеристики для случаев комбинирования информации;

- применение алгоритмов комбинирования информации двух или трёх датчиков не может улучшить характеристики обнаружения по сравнению с характеристиками отдельного датчика, если значения отношения сигнал/шум в датчиках составляют менее 0,65 – 0,7 от значения отношения в этом датчике;

- при использовании алгоритмов комбинирования информации в системе из двух датчиков наиболее высокую эффективность имеет правило принятия решений «2 из 2». В слу-

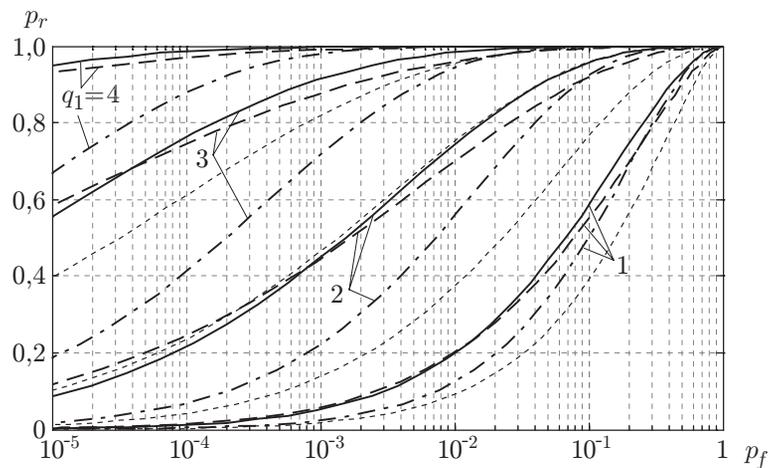


Рис. 3. Рабочие характеристики системы из трёх равноточных датчиков при различных алгоритмах комбинирования информации

чае системы из трёх датчиков наиболее высокую эффективность в диапазоне вероятностей ложных тревог от 10^{-1} до 10^{-3} — 10^{-4} имеет правило «2 из 3».

Последнее положение подтверждают графики рис. 3, построенные для равноточных датчиков. Штрихпунктирными кривыми показаны характеристики обнаружения для правила «1 из 3», сплошными кривыми — аналогичные характеристики для правила «2 из 3», штриховыми — для правила «3 из 3», пунктирными кривыми — для случая одного датчика.

Обнаружение на основе формирования единого изображения. Особенностью способа совместной обработки видовой информации, основанного на формировании единого синтетического изображения, является необходимость приведения всех отдельных изображений, получаемых различными датчиками, к единому формату, т. е. к одинаковому пространственному масштабу и к одному и тому же количеству строк и столбцов в каждом изображении. Получение одного синтетического изображения из совокупности первичных подразумевает его последующее предъявление для обнаружения объекта скорее человеку-оператору, а не автоматическому устройству.

Очевидным вариантом создания синтетического изображения является его формирование в виде монохромной линейной комбинации исходных изображений. Тогда задача обнаружения объекта на таком изображении может быть поставлена как задача различения двух гипотез:

$$H_1: u(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^J w_j s_j(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^J w_j n_j(\mathbf{x}); \quad H_0: u(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^J w_j p_j(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^J w_j n_j(\mathbf{x}). \quad (12)$$

Здесь w_j — весовые коэффициенты, подлежащие определению таким образом, чтобы максимизировать вероятность обнаружения объекта. Спектральная плотность эквивалентного белого шума N , представленного последними суммами в выражениях (12), определяется

$$N = \sum_{j=1}^J w_j^2 N_j.$$

По аналогии с (2) отношение сигнал/шум в задаче различения гипотез (12) имеет вид

$$q = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J \int_L w_i w_j (s_i(\mathbf{x}) - p_i(\mathbf{x}))(s_j(\mathbf{x}) - p_j(\mathbf{x})) d\mathbf{x} \right)^{1/2}, \quad (13)$$

где L — общая для всех датчиков область формируемых ими изображений, ограниченная контуром обнаруживаемого объекта. Введём обозначения:

$$c_j \triangleq w_j \sqrt{N_j} / \left(\sum_{j=1}^J w_j^2 N_j \right)^{1/2}; \quad d_{ij} \triangleq \frac{1}{\sqrt{N_i N_j}} \int_L (s_i(\mathbf{x}) - p_i(\mathbf{x}))(s_j(\mathbf{x}) - p_j(\mathbf{x})) d\mathbf{x}. \quad (14)$$

Тогда, как нетрудно заметить, $\sum_{j=1}^J c_j^2 = 1$, $|c_i| \leq 1$, $d_{ii} = q_i^2$ и в соответствии с неравенством

Коши — Буняковского $d_{ij} \leq q_i q_j$. С учётом этих обозначений выражение (13) принимает следующий вид:

$$q = \left(\sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J c_i c_j d_{ij} \right)^{1/2}. \quad (15)$$

Теперь задача максимизации вероятности обнаружения объекта свелась к определению таких коэффициентов c_j , которые максимизируют отношение сигнал/шум q .

Рассмотрим в качестве примера случай использования в системе обнаружения двух датчиков. Тогда из (15) следует:

$$q^2 = c_1^2 q_1^2 + (1 - c_1^2) q_2^2 + 2c_1 \sqrt{1 - c_1^2} d_{1,2}. \quad (16)$$

Для удобства дальнейшего изложения полагаем, что коэффициент c_1 относится к тому датчику, отношение сигнал/шум q_1 для которого максимально. Из необходимого условия экстремума q^2 по c_1 ($d(q^2)/dc_1 = 0$) следует:

$$\frac{c_1 \sqrt{1 - c_1^2}}{2c_1^2 - 1} = \frac{d_{1,2}}{q_1^2 - q_2^2}. \quad (17)$$

Уравнение (17) относительно c_1 может быть решено численными методами. Кривые, позволяющие по конкретным значениям правой части выражения (17) находить значения c_1 , а по ним и значения весовых коэффициентов w_i , приведены на рис. 4. После определения c_1 абсолютное значение коэффициента c_2 находится очевидным образом: $|c_2| = +\sqrt{1 - c_1^2}$. Причём, как следует из анализа выражения (16), знак при коэффициенте c_2 должен совпадать со знаком при $d_{1,2}$. Теперь искомые значения коэффициентов w_j , образующих линейную комбинацию (12), с точностью до несущественного для нашей задачи и общего для всех w_j постоянного множителя определяются с использованием выражения (14):

$$w_j = c_j / \sqrt{N_j}.$$

Анализ (16) показывает, что синтезирование общего изображения из двух, сформированных разными датчиками, имеет смысл, когда два разностных сигнала объекта и фона,

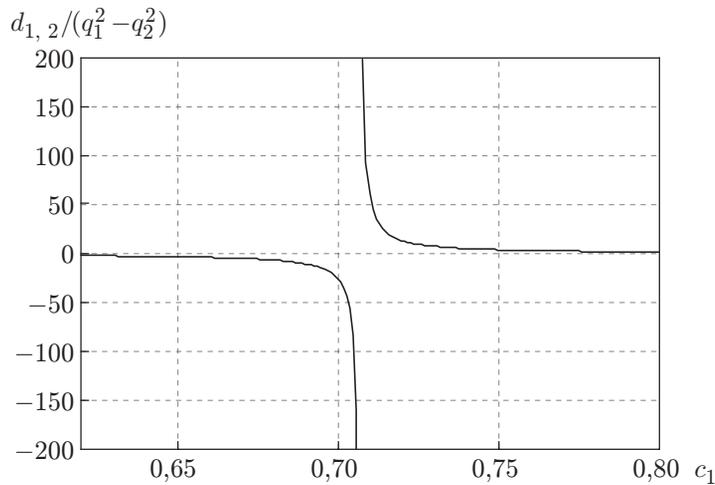


Рис. 4. Кривые для отыскания численных значений весовых коэффициентов

сформированных каждым датчиком, пространственно коррелированы, т. е. когда $d_{ij} \neq 0$. В противном случае при обнаружении должно использоваться изображение с выхода только того датчика, который реализует максимальное значение отношения сигнал/шум.

Если $q_k^2 = q_1^2 + q_2^2$ — отношение сигнал/шум, реализуемое при комплексировании информации датчиков, то легко убедиться, что справедливо неравенство $q_k^2 - q^2 > 0$, что, в свою очередь, свидетельствует о проигрыше по эффективности рассматриваемого способа совместной обработки изображений способу комплексирования информации этих же датчиков. Такой проигрыш определяется прежде всего тем, что при монохромном синтезировании единого изображения теряется информация о характере спектральных и других различий исходных изображений, тогда как такие различия в полной мере учитываются при комплексировании информации.

Можно ожидать, что при формировании синтезированного немонахромного изображения путём, например, представления исходных изображений в псевдоцветах, эффективность обнаружения объектов возрастёт. Однако при реализации подхода в автоматических решающих устройствах он всё равно будет проигрывать подходу, использующему комплексирование информации различных датчиков. В то же время подход, основанный на комплексировании информации, в принципе нереализуем, когда обнаружение объекта на изображении выполняет человек-оператор. Именно в этом случае представляется перспективным синтез в псевдоцветах единого немонахромного изображения, целесообразность чего подтверждается также данными некоторых источников, в частности упомянутых в [2]. При таком синтезе могут быть полезными определения спектральной характеристики и цветового контраста, введённые в [4, 5], а также содержащийся в этих работах анализ некоторых закономерностей обнаружения объектов по гиперспектральным (т. е. пространственно-спектральным) данным.

При этом необходимо в достаточной мере учитывать принципиальные особенности цветового зрения человека.

Заключение. Во всех случаях характеристики обнаружения пространственных объектов при использовании алгоритмов комплексирования информации, получаемой от совокупности датчиков изображений, существенно превышают такие же характеристики как для случаев комбинирования информации, так и при использовании единого изображения, синтезированного из совокупности исходных. Это в первую очередь обусловлено полным учётом спектральных и других различий при синтезе алгоритма комплексирования информации.

При использовании алгоритмов комбинирования информации в системе из двух датчиков наиболее высокую эффективность имеет правило принятия решений «2 из 2». В случае системы из трёх датчиков наиболее высокую эффективность, по крайней мере в диапазоне вероятностей ложных тревог от 10^{-1} до $10^{-3} - 10^{-4}$, имеет правило принятия решений «2 из 3».

Применение правила обнаружения « n из m » в случае использования 2 или 3 датчиков и при фиксированном уровне ложных тревог не может увеличить вероятность обнаружения по сравнению с вероятностью, реализуемой только одним из этих датчиков с максимальным значением отношения сигнал/шум, если это отношение во всех других датчиках не превышает 0,65 – 0,7 указанного максимального значения.

Для случая синтеза единого монохромного изображения в виде линейной комбинации двух исходных изображений получены общие соотношения, определяющие оптимальные значения коэффициентов линейной комбинации, максимизирующих отношение сигнал/шум и зависящих от значений отношения сигнал/шум и от спектральной плотности шумов в каждом из каналов, а также от уровня взаимной пространственной корреляции сигналов различных каналов.

Синтез единого монохромного изображения из двух, сформированных разными датчиками, не повышает эффективности обнаружения объектов по сравнению с использованием изображения только одного датчика с максимальным отношением сигнал/шум, если сигналы на выходе датчиков взаимно не коррелированы.

При синтезе единого изображения из совокупности имеющихся для предъявления его человеку-оператору представляется целесообразным синтез этого изображения в псевдоцветах. Обычно в основу такого синтеза закладываются эвристические положения. Однако в последнее время появился ряд исследований в области способов обработки гиперспектральных данных [4, 5]. Такие исследования создают научные предпосылки для развития методов статистического синтеза единого монохромного изображения из состава имеющихся в интересах его последующего предъявления человеку-дешифровщику, что делает актуальным проведение соответствующих исследований в дальнейшем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анищенко А. В., Огреб С. М., Юхно П. М. Сравнительный анализ панхроматического и многоспектрального режимов обнаружения пространственных объектов // Оптика атмосферы и океана. 2013. **26**, № 8. С. 673–678.
2. Иванкин Е. Ф., Понькин В. А. Теоретические основы защиты информации об объектах наблюдения. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 556 с.
3. Иванов В. П., Курт В. И., Овсянников В. А., Филиппов В. Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Изд-во НПО ГИПО, 2006. 595 с.
4. Юхно П. М., Огреб С. М., Тишанинов М. В. Статистический синтез гиперспектрального обнаружителя // Автометрия. 2015. **51**, № 3. С. 61–69.
5. Огреб С. М., Тишанинов М. В., Юхно П. М. Некоторые закономерности обнаружения объектов по гиперспектральным данным // Оптика атмосферы и океана. 2018. **31**, № 4. С. 160–164.

Поступила в редакцию 02.04.2019

После доработки 29.04.2019

Принята к публикации 14.05.2019