Обнаружитель объектов на изображении при действии нестационарного фона

В. Ю. Волков, Р. Р. Булякулов, О. А. Маркелов, М. И. Богачев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
e-mail: vladimi-volkov@yandex.ru

***Аннотация.* Рассматривается задача обнаружения объектов на изображениях, формируемых радиотехническими системами наблюдения. Исследуется применение обнаружителя с движущимися окнами для формирования сигнальной и помеховой статистик. Для принятия решения применяется адаптивный порог, использующий помеховую статистику. Рассчитаны характеристики обнаружения такого обнаружителя при экспоненциальной статистике сигнала и фона.**

Ключевые слова: обнаружение объектов; характеристики обнаружения; анализ изображений; адаптивный порог; нестационарный фон

I. Введение

Задача обнаружения и локализации малоразмерных объектов на зашумленных изображениях возникает в радиотехнических системах наблюдения, использующих радары с САР, инфракрасные и лазерные системы, а также телевизионные камеры [1-3]. Эта задача является актуальной, поскольку указанные объекты обычно имеют искусственное происхождение и представляют первостепенный интерес.

При обнаружении и локализации таких объектов возникают существенные трудности построения эффективных алгоритмов, поскольку в принимаемых изображениях имеется интенсивный и нестационарный фон. Статистика фона весьма отличается от гауссовской, распределения явно асимметричны, при исследовании полагалось, что как фоновые, так и сигнальные выборки имеют экспоненциальное распределение, а форма и размеры обнаруживаемых объектов известны. В некотором смысле экспоненциальное распределение представляет достаточно неблагоприятную ситуацию по сравнению с другими модельными распределениями сигнала и фона.

Широкий класс обнаружителей решает задачу обнаружения объектов на изображениях путем организации движущихся сигнального и помехового окон, вычисления двух решающих статистик в этих окнах, и формирования локального адаптивного порога по помеховой статистике для сравнения с сигнальной статистикой, и принятия решения. Несмотря на широкое применение таких алгоритмов, установка пороговых констант и расчет характеристик обнаружения представляет известные трудности. В случае экспоненциальных распределений эта задача решена для обнаружения точечного объекта, когда сигнальная статистика представляет единственное выборочное значение на изображении [1].

Представляет практический интерес случай накопления выборок в сигнальном окне. При этом сигнальное окно обычно согласовано с формой и размерами объекта интереса. Точные расчеты характеристик обнаружения провести не удалось.

Целью статьи является приближенный расчет характеристик обнаружения, основанный на методе «подвешенной» (titled) переменной, который позволяет установить пороговую константу в алгоритме обнаружения, а также рассчитать потери в пороговом отношении сигнал/шум по сравнению с постоянным порогом обнаружения при стационарном фоне.

II. Постановка задачи и алгоритм обнаружения объектов на изображениях

Существует достаточное число известных алгоритмов обнаружения объектов на нестационарном фоне [1,2]. Класс обнаружителей с адаптивным порогом включает структуры, которые используют окна (маски), движущиеся по изображению, причем сигнальное окно обычно располагается в центре движущегося окна, а помеховое окно окаймляет сигнальное. Сигнальное окно выбирается в соответствии с размерами и формой объектов интереса на изображении.

На рис. 1 представлены примеры неориентированных и ориентированных масок, используемых для обнаружения объектов. Значения коэффициентов a и b обычно постоянны в пределах соответствующих окон, и связаны с числом выборок в окне. Их значения в конечном итоге входят в пороговые константы алгоритма. Неориентированные маски обычно имеют квадратные формы окон (рис. 1*а*). Разновидностью ориентированных масок является незамкнутое помеховое окно, что позволяет эффективно выделять конечные точки объектов в форме отрезков неизвестной длины (рис. 1*б*).

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 18-71-10060

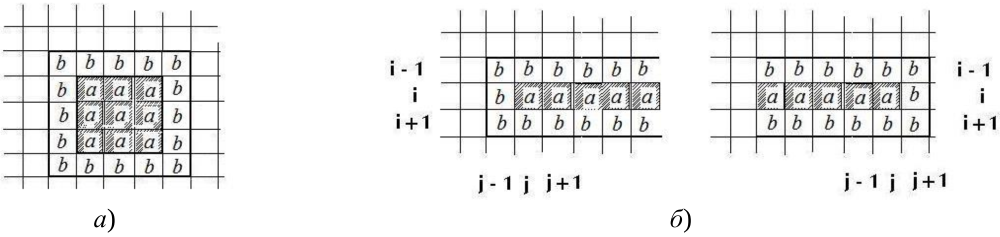

Рис. 1. Пространственно-ориентированные и неориентированные маски для движущихся окон

Пусть $y=(y_1, y_2, ..., y_N)$ и $x=(x_1, x_2, ..., x_M)$ – соответственно сигнальная и помеховая независимые выборки, получаемые в пределах сигнального и помехового окон. Рассмотрим экспоненциальную модель распределений: $f_0(y_k)=(1/\beta_0)\exp(-y/\beta_0)$ для каждой помеховой выборки, $f_1(y_k)=(1/\beta_1)\exp(-y/\beta_1)$ – для каждой сигнальной выборки. Отношение сигнал/шум на входе определяется как относительное увеличение параметра масштаба всех выборок в сигнальном окне: $d=(\beta_1-\beta_0)/\beta_0$.

Алгоритм обнаружения с адаптивным порогом имеет вид $u(y)\ge c_1\cdot v(x)$, где $u(y)$ и $v(x)$ – сигнальная и помеховая статистики соответственно, c_1 – пороговая константа, значение которой устанавливается так, чтобы обеспечить заданную вероятность ложной тревоги в соответствии с критерием Неймана–Пирсона. Другая форма этого алгоритма $u(y)-c_1\cdot v(x)\ge 0$ предусматривает сравнение с нулевым порогом статистики $z(u,v)=u(y)-c_1\cdot v(x)$. В некоторых случаях вместо нулевого вводится небольшой положительный порог z_T в целях загрубления алгоритма и повышения устойчивости (робастности) к мешающим факторам.

Значения N и M, задающие числа сигнальных и помеховых выборок, определяются выбранной формой и размерами маски движущегося окна. Имеют место следующие типовые сочетания квадратных сигнальных и помеховых окон в пикселах: (1x1)-(3x3); (3x3)-(5x5); (5x5)-(7x7), где в первой скобке указан размер сигнального окна, а во второй – размер помехового. Помеховое окно окаймляет сигнальное, поэтому число помеховых выборок оказывается равным соответственно $M=8;\ 16;\ 24$. Увеличение размера помехового окна позволяет улучшить статистические свойства помеховой статистики. Однако это нецелесообразно вследствие снижения разрешающей способности при появлении близких объектов.

Наиболее применяемый алгоритм обнаружения производит суммирование выборок в пределах сигнального и помехового окон.

Задачей является установка пороговой константы c_1 для алгоритма $u(y)-c_1\cdot v(x)\ge z_T$ и исследование его характеристик обнаружения в сравнении с алгоритмом, работающим в условиях известных параметров распределений.

III. Анализ характеристик обнаружения для постоянного порога

Для экспоненциальных распределений сигнальная статистика $u(y)=\sum_{k=1}^{N} y_k / N$ является достаточной. Алгоритм сравнения с постоянным порогом $u(y)\ge c$ является оптимальным в случае известного параметра β_0, где пороговая константа c вычисляется для заданной вероятности ложной тревоги. Статистика $u_0=u(y)N/\beta_0$ при отсутствии сигнала имеет центральное распределение χ^2_N с N степенями свободы, которое совпадает с гамма-распределением $G(\alpha=N,\ 1)$. При появлении сигнала такое же распределение $G(N,\ 1)$ имеет статистика $u_1=u(y)N/\beta_1=u_0/(1+d)$. Таким образом, имеет место увеличение параметра масштаба статистики u_0 в $(1+d)$ раз.

Характеристики обнаружения определяются через интеграл вероятности гамма-распределения (неполную гамма-функцию) $\gamma(\alpha,x)=\int_0^x t^{\alpha-1}\exp(-t)dt$. Пользуясь тем, что $\alpha=N$ – целое, можно записать вероятность превышения порога в виде

$$D_0 = P_1(u_0 \ge c_0) =$$

$$= \exp(-c\cdot N / \beta_0(1+d)) \sum_{k=0}^{N-1} (c\cdot N)^k / [\beta_0^k (1+d)^k k!].$$

Здесь константа $c_0=cN/\beta_0(1+d)$ – есть процентная точка стандартного гамма-распределения $G(N,\ 1)$. Порог обнаружения $c=c_0\beta_0/N$ находится при $d=0$, и он зависит от интенсивности шума β_0 и числа выборок N.

Характеристики обнаружения для постоянного порога вычислены для значения $\beta_0=1$, $N=9$, и приведены на рис. 2 (пунктирная линия). В частном случае $N=1$ имеем выражения из [1]:

$$F_0=\exp(-c/\beta_0),\ D_0=\exp(-c/[\beta_0(1+d)]).$$

IV. Анализ характеристик обнаружения для адаптивного порога

Статистика $z(u,v)=u(y)-c_1 v(x)$, где $u(x)= = \sum_{k=1}^{N} y_i / N$, $v(x)=\sum_{k=1}^{M} x_i / M$, представляет разность двух гамма-распределений $z_1 \sim G(N,\beta_1/N)$ и $z_2 \sim G(M,c_1\,\beta_0/\mathrm{M})$ с разными степенями свободы. Логарифм характеристической функции такой разности равен

$$\ln \Psi_z(jt) = -N\ln(1-jt\beta_1/N) - M\ln(1+jtc_1\beta_0/M).$$

Это выражение позволяет вычислить все кумулянты решающей статистики, что дает возможность использовать различные аппроксимации для неизвестной плотности вероятности $f(z)$, и, следовательно, для вероятности превышения порога. Пороговая константа c_1 определяет вероятность ложной тревоги. Ее вычисление представляет одну из поставленных задач.

Первые два кумулянта распределения статистики получаются в виде $\kappa_1=\beta_1-c_1\beta_0$, $\kappa_2=\beta_1^2/N+(c_1\beta_0)^2/M$. В рамках гауссовской аппроксимации имеем выражение для вероятности ложной тревоги $F_G=1-\Phi(-\kappa_1/\sqrt{\kappa_2})$, которое в принципе позволяет вычислить пороговую константу и рассчитать характеристики обнаружения. Однако существует более точное приближение для указанной вероятности, связанное с введением так называемой «подвешенной переменной» (в англ. литературе «titled variable» [3]).

Рассмотрим *сопряженное* семейство $p(z,\lambda)$ с параметром $\lambda>0$, такое, что $p(z,\lambda)=\exp(\lambda z)f(z)/\Psi(\lambda)$. Здесь $\lambda>0$ – некоторая «подвешенная» вещественная переменная, изменение которой деформирует плотность вероятности $f(z)$ в область бóльших (или меньших) значений, чтобы обеспечить более точное вычисление вероятностей. Тогда вероятность превышения некоторого порога z_T равна

$$P(z\ge z_T)=\int_{z_T}^{\infty} f(z)dz = \Psi(\lambda)\int_{z_T}^{\infty}\exp(-\lambda z)p(z,\lambda)dz .$$

Для сопряженной плотности $p(z,\lambda)$ используются аппроксимации или граничные выражения. Смысл ее применения состоит в том, что выбором параметра λ плотность деформируется и ее математическое ожидание смещается в сторону порога. Аппроксимация сопряженной плотности $p(z,\lambda)$ в окрестности ее вершины оказывается более удачной, чем аппроксимация плотности $f(z)$ в области ее «хвостов». В частности, сопряженную плотность в окрестности ее математического ожидания можно аппроксимировать гауссовской $p_a(z,\lambda)\sim N(m_\lambda,\sigma_\lambda^2)$ с параметрами m_λ и σ_λ^2.

Удобнее перейти от характеристических функций к производящим функциям моментов. Для искомой плотности $\Psi(v)=\exp(\mu(v))$. Поскольку производящая функция моментов для сопряженной плотности равна $\varphi(v,\lambda)=\Psi(\lambda+v)/\Psi(\lambda)$, то математическое ожидание и дисперсию последней можно вычислить по формулам:

$$m_\lambda=(d\ln\varphi(v,\lambda)/dv)_{v=0}=d\ln\Psi(\lambda)/d\lambda=\mu'(\lambda),$$
$$\sigma_\lambda^2=d^2\ln\Psi(\lambda)/d\lambda^2=\mu''(\lambda).$$

Подставляя выражение $p_a(u,\lambda)\sim N(m_\lambda,\sigma_\lambda^2)$ для гауссовской плотности вместо $p(u,\lambda)$, получаем выражение для расчета вероятности превышения порога в виде

$$P(z\ge z_T)=\Psi(\lambda)\cdot[1-\Phi(\sigma_\lambda\lambda+c_{1T}-m_\lambda)]\times$$
$$\times\exp(-m_\lambda\lambda+\sigma_\lambda^2\lambda^2/2),$$

где значение λ определяет параметры аппроксимации m_λ и σ_λ.

Параметр λ можно выбрать из условия наилучшей аппроксимации в области порогового значения z_T, т. е. так, чтобы математическое ожидание m_λ сопряженной плотности $p(z,\lambda)$ совпало с порогом z_T. Для этого надо решить уравнение $z_T=m_\lambda=\mu'(\lambda)$ относительно λ, найти решение λ_a, и выбрать $\sigma_a^2=\mu''(\lambda_a)$. Тогда окончательно получаем расчетное выражение

$$P(z\ge z_T)=[1-\Phi(\sigma_a\lambda_a)]\cdot\exp[\mu(\lambda_a)-z_T\lambda_a+\sigma_a^2\lambda_a^2/2]$$

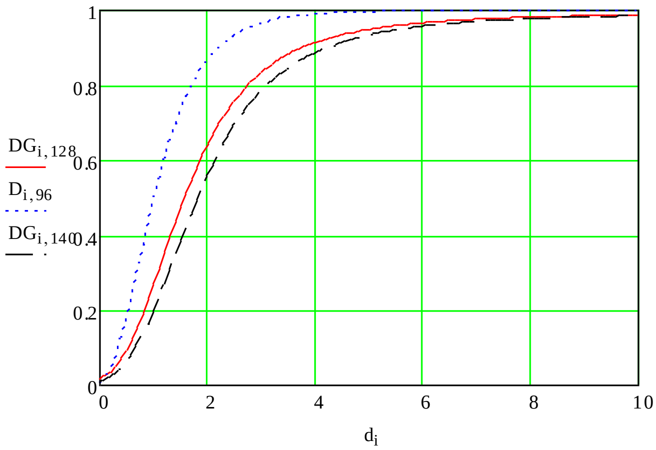

Рис. 2. Характеристики обнаружения алгоритма с адаптивным порогом (сплошная линия) и с постоянным порогом (пунктир), штриховая линия построена при гауссовской аппроксимации

Данный метод использован для вычисления пороговой константы c_1 и расчета характеристик обнаружения. На рис. 2 представлен график характеристики обнаружения для $N = 9$, $M = 16$.

V. Заключение

Предложен алгоритм обнаружения малоразмерных объектов на изображениях, содержащих нестационарный фон. Алгоритм включает организацию движущихся сигнального и помехового окон и формирование адаптивного порога по выборкам помехового окна. Реализован приближенный метод расчета пороговой константы алгоритма для экспоненциальной статистики выборок и характеристик обнаружения, использующий «подвешенную» переменную.

Список литературы

[1] Волков В.Ю. Адаптивные и инвариантные алгоритмы обнаружения объектов на изображениях и их моделирование в Matlab: Учебное пособие. СПб. 2-е изд. Изд-во «Лань», 2014. 191 с.

[2] Sezgin M., Sankur B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation // Journal of Electronic Imaging. 2004. V. 13(1), P. 146–165.

[3] Ван Трис Г.Л. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т.1. Пер. с англ. М: Советское радио, 1972. 744 с.