

Информационные показатели неопределенности – основа для оптимизации радиоэлектронного подавления радиоэлектронного средства наблюдения

В.Н. Юдин

Аннотация

Рассматривается задача оптимизации радиоэлектронного подавления радиоэлектронного средства наблюдения. Показано, что критериальные функции для таких задач перспективно строить на основе информационных показателей неопределенности, определяемых как энтропия апостериорных распределений вероятностей параметров, измеряемых по результатам наблюдения.

Ключевые слова

Радиопомехи; оптимальное противодействие; обнаружение; энтропийные показатели неопределенности; факт присутствия.

Радиоэлектронное подавление (РЭП) радиоэлектронных средств (РЭС) наблюдения реализуется путем создания радиопомех, затрудняющих функционирование подавляемых РЭС. Основные виды помех, применяемые для противодействия РЭС наблюдения различного назначения, а также способы их формирования и применения, описаны в современной отечественной и зарубежной литературе по радиоэлектронной борьбе (РЭБ), например, в [1]. В частности, широко применяются активные маскирующие (шумовые) и имитирующие помехи.

При рассмотрении задач РЭП, как и других задач радиотехники, естественным образом возникают вопросы об отыскании наилучших (оптимальных) способов их решения. Сущность оптимизации РЭП состоит в следующем. В конфликте между средствами РЭП и

подавляемыми РЭС наблюдения интерес стороны РЭС заключается в том, чтобы результаты наблюдения были как можно более достоверными. Для достижения этого сторона РЭС стремится обеспечить максимально высокие уровни показателей качества выполнения операций наблюдения. Такими операциями обычно являются обнаружение представляющих интерес объектов, определение их координат и параметров движения (дальность, азимут, угол места, скорость и ускорение движения), определения типа объектов, характера их действий и т.д. Показателями качества могут быть вероятности правильных и ошибочных решений, ошибки измерения параметров объектов. Очевидно, наибольший возможный уровень достоверности результатов наблюдения достигается тогда, когда на стороне РЭС реализуются оптимальные алгоритмы выполнения указанных операций, предписываемые теорией оптимальных измерительных систем (теорией оптимального обнаружения сигналов и оценивания их параметров, теорией распознавания образов и т.п.).

Интерес стороны, реализующей противодействие РЭС наблюдения путем создания радиопомех – противоположный по отношению к интересу стороны РЭС. А именно, сторона постановщика помех (ПП) должна стремиться к тому, чтобы результаты наблюдения, получаемые подавляемым РЭС, были как можно менее достоверными. При этом логично предположить, что если существует наименьший возможный уровень достоверности результатов наблюдения, то сторона ПП должна стремиться к его достижению путем организации противодействия некоторым оптимальным образом. Сказанное определяет сущность задачи оптимизации противодействия РЭС наблюдения.

Полное раскрытие содержания оптимального противодействия требует решения следующих задач.

1. Разработка аппарата количественного описания достоверности результатов наблюдения.

2. Выявление условий, при которых принятые показатели достоверности результатов наблюдения принимают наименьшие значения (условий оптимального противодействия).

3. Оценка реализуемости условий оптимального противодействия РЭС наблюдения путем создания радиопомех различных типов.

4. Разработка предложений по типам, параметрам и способам создания радиопомех, позволяющих реализовать условия оптимального противодействия РЭС наблюдения со стороны ПП.

5. Анализ эффективности предложений по оптимизации помехового противодействия наблюдению.

Данная работа посвящена первой из указанных задач. Сущность предлагаемого подхода к количественному описанию достоверности наблюдения объекта заключается в следующем. Предположим, что подавляемое РЭС наблюдения реализует принципы построения оптимальных измерительных систем. Это означает, что указанные выше операции обнаружения объектов, определения их координат, параметров движения, типа и т. д. выполняются с использованием соответствующих оптимальных алгоритмов, описанных, например, в [2]. Такое предположение оправдано тем, что с точки зрения средств РЭБ логично ориентироваться на «идеального» наблюдателя, при этом, очевидно, результаты подавления реальных приборов наблюдения окажутся заведомо не худшими.

Как известно, базовым принципом теории оптимальных измерительных систем является формирование апостериорных распределений вероятностей (РВ) измеряемых параметров по результатам наблюдения [3]. Если по реализации наблюдаемого процесса Y подлежит измерению непрерывный параметр x , принимающий значения на отрезке $[x_a, x_b]$, то на этом отрезке необходимо сформировать апостериорную плотность распределения вероятностей (ПРВ) $p(x/Y)$. После этого в качестве оценки \hat{x} измеряемого параметра может быть взято, апостериорное среднее

$$\hat{x} = M[x/Y] = \int_{x_a}^{x_b} x p(x/Y) dx \quad (1)$$

или мода

$$\hat{x} = \arg \max_{x \in [x_a, x_b]} p(x/Y) \quad (2)$$

Если измеряемый параметр x – дискретный, принимает значения x_1, x_2, \dots, x_N , то по наблюдениям Y оптимальный измеритель формирует апостериорные вероятности $P(x_1/Y), P(x_2/Y), \dots, P(x_N/Y)$, а оценка параметра может быть сформирована как решение уравнения

$$P(\hat{x}) = \max_i \{ P(x_i/Y), i = 1, 2, \dots, N \} \quad (3)$$

Таким образом, при построении оптимизированных измерительных систем необходимой операцией является формирование по полученной реализации наблюдаемого процесса апостериорного РВ измеряемых параметров, например, в виде совокупности вероятностей $P(x_1/Y), P(x_2/Y), \dots, P(x_N/Y)$ или в виде ПРВ $p(x/Y)$. Существенно, что для формирования точечных оценок (1), (2), (3) анализ апостериорного РВ для получения

оценок представляющих интерес параметров необходимо выполнять в пределах всей области определения измеряемого параметра (на всем отрезке $[x_n, x_k]$ или на всем множестве $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ (включая области как главного, так и боковых лепестков соответствующей функции РВ). Однако в действующих измерительных системах полный анализ апостериорного РВ (или его технического воплощения – «сигнальной функции») обычно не производят, заменяя его анализом области главного лепестка или только его вершины.

Учитывая фундаментальное значение формирования апостериорных РВ измеряемых параметров при функционировании современных оптимизированных измерительных систем, представляется логичным, что противодействие таким системам должно быть направлено на искажение формируемых ими апостериорных РВ («сигнальных функций»). Очевидно, искажение может быть достигнуто путем создания радиопомех. При этом, если иметь в виду оптимальное противодействие, то такое искажение должно обеспечивать экстремум некоторой критериальной функции, зависящей от показателей достоверности работы системы.

Обычно достоверность результатов наблюдения характеризуют числовыми параметрами, например, вероятностями правильных и ошибочных решений (при обнаружении и классификации объектов), величинами среднеквадратических ошибок (СКО) измерения непрерывных параметров (расстояния до объекта, его угловых координат, скорости) и др. Существенно, что указанные вероятности и среднеквадратические ошибки, как правило, однозначно определяются, если известны апостериорные РВ измеряемых параметров. Однако обоснование вида критериальной функции для задачи оптимизации противодействия на их основе представляет собой задачу, имеющую самостоятельное значение.

В данной работе предлагается в качестве показателя достоверности результатов наблюдения использовать другой числовой параметр - информационную энтропию апостериорных РВ измеряемых параметров. Как известно, информационная энтропия является мерой неопределенности случайной величины. В данном случае случайными являются результаты наблюдения, поэтому энтропию логично рассматривать как показатель достоверности этих результатов. Она также, как и перечисленные выше точностные и вероятностные показатели, однозначно определяется по известному апостериорному РВ.

Пусть, как указано выше, для формирования оценок вида (1), (2), (3) измерительная система формирует апостериорное РВ измеряемого параметра x в виде совокупности $P(x_1/Y), P(x_2/Y), \dots, P(x_N/Y)$ вероятностей дискретных значений этого параметра

или в виде ПРВ $p(x/Y)$ (если параметр x - непрерывный). Тогда количественной мерой достоверности результатов измерения соответственно дискретного и непрерывного параметра может служить апостериорная энтропия

$$E_x = - \sum_{i=1}^N P(x_i / Y) \log(P(x_i / Y)); \quad (4)$$

$$E_x = - \int_{x_{np}}^{x_a} p(x/Y) \log(p(x/Y)) dx. \quad (5)$$

Рассмотрим случай, когда измерению подлежит дискретный параметр «факт присутствия объекта» ($\Phi\Pi$), принимающий значения $\Phi\Pi = 0$ (объект отсутствует) и $\Phi\Pi = 1$ (объект присутствует). В этом случае измерителем является обнаружитель объекта, формирующий оценки $\Phi\hat{\Pi} = 1$ и $\Phi\hat{\Pi} = 0$ параметра $\Phi\Pi$ (например, радиолокационный обнаружитель), которые будем рассматривать как результаты первичного наблюдения. В случае РЛ наблюдения эти оценки формируются подсистемой первичной обработки РЛ информации [3]. Апостериорные вероятности $P(\Phi\Pi / \Phi\hat{\Pi})$ определяются по схеме Байеса соотношениями [4]

$$P(\Phi\Pi = 1 / \Phi\hat{\Pi} = 1) = \frac{P(\Phi\Pi = 1) P(\Phi\hat{\Pi} = 1 / \Phi\Pi = 1)}{P(\Phi\Pi = 1) P(\Phi\hat{\Pi} = 1 / \Phi\Pi = 1) + P(\Phi\Pi = 0) P(\Phi\hat{\Pi} = 1 / \Phi\Pi = 0)}, \quad (6)$$

$$P(\Phi\Pi = 0 / \Phi\hat{\Pi} = 1) = \frac{P(\Phi\Pi = 0) P(\Phi\hat{\Pi} = 1 / \Phi\Pi = 0)}{P(\Phi\Pi = 1) P(\Phi\hat{\Pi} = 1 / \Phi\Pi = 1) + P(\Phi\Pi = 0) P(\Phi\hat{\Pi} = 1 / \Phi\Pi = 0)}, \quad (7)$$

$$P(\Phi\Pi = 1 / \Phi\hat{\Pi} = 0) = \frac{P(\Phi\Pi = 1) P(\Phi\hat{\Pi} = 0 / \Phi\Pi = 1)}{P(\Phi\Pi = 1) P(\Phi\hat{\Pi} = 0 / \Phi\Pi = 1) + P(\Phi\Pi = 0) P(\Phi\hat{\Pi} = 0 / \Phi\Pi = 0)}, \quad (8)$$

$$P(\Phi\Pi = 0 / \Phi\hat{\Pi} = 0) = \frac{P(\Phi\Pi = 0) P(\Phi\hat{\Pi} = 0 / \Phi\Pi = 0)}{P(\Phi\Pi = 1) P(\Phi\hat{\Pi} = 0 / \Phi\Pi = 1) + P(\Phi\Pi = 0) P(\Phi\hat{\Pi} = 0 / \Phi\Pi = 0)}, \quad (9)$$

Вероятности, входящие в (6), (7), имеют следующий смысл: $P(\Phi\Pi=1) = P_a$ и $P(\Phi\Pi=0) = 1 - P_a$ - априорные вероятности наличия и отсутствия объекта в рассматриваемом элементе разрешения; $P(\Phi\hat{\Pi} = 1 / \Phi\Pi = 1) = D$ - вероятность правильного обнаружения объекта, расположенного в рассматриваемом элементе; $P(\Phi\hat{\Pi} = 1 / \Phi\Pi = 0) = F$ - вероятность ложной тревоги. С учетом (6), (7), (8), (9) энтропийные показатели неопределенности факта присутствия объекта в рассматриваемом элементе разрешения (см. (4)) при условии, что получены наблюдения $\Phi\hat{\Pi} = 1$ и $\Phi\hat{\Pi} = 0$ определяются соотношениями [4]

$$E_{\Phi\Pi}(\Phi\hat{\Pi} = 1) = -\left\{ \frac{P_a D}{P(\Phi\hat{\Pi} = 1)} \log \left[\frac{P_a D}{P(\Phi\hat{\Pi} = 1)} \right] + \frac{(1-P_a)F}{P(\Phi\hat{\Pi} = 1)} \log \left[\frac{(1-P_a)F}{P(\Phi\hat{\Pi} = 1)} \right] \right\}; \quad (10)$$

$$E_{\Phi\Pi}(\Phi\hat{\Pi} = 0) = -\left\{ \frac{P_a(1-D)}{P(\Phi\hat{\Pi} = 0)} \log \left[\frac{P_a(1-D)}{P(\Phi\hat{\Pi} = 0)} \right] + \frac{(1-P_a)(1-F)}{P(\Phi\hat{\Pi} = 0)} \log \left[\frac{(1-P_a)(1-F)}{P(\Phi\hat{\Pi} = 0)} \right] \right\}, \quad (11)$$

где

$$P(\Phi\hat{\Pi} = 1) = P_a D + (1 - P_a) F ;$$

$$P(\Phi\hat{\Pi} = 0) = (1 - P_a)(1 - F) + P_a(1 - D)$$

- полная вероятность событий $\Phi\hat{\Pi} = 1$ и $\Phi\hat{\Pi} = 0$ соответственно.

Показатели (10) и (11) представляют собой условную энтропию (при условии $\Phi\hat{\Pi} = 1$ и $\Phi\hat{\Pi} = 0$ соответственно) апостериорных вероятностных распределений, формируемых обнаружителем. Для получения на их основе количественных оценок неопределенности факта присутствия объекта необходимо знать присущие прибору наблюдения вероятности D и F , а также априорную вероятность P_a . Представляет также интерес получение количественных оценок неопределенности факта присутствия объекта, безусловных по отношению к результатам первичного наблюдения. Такие оценки могут быть получены на основе средней энтропии [4]

$$\begin{aligned} E_{\Phi\Pi} &= E_{\Phi\Pi}(\Phi\hat{\Pi} = 0)P(\Phi\hat{\Pi} = 0) + E_{\Phi\Pi}(\Phi\hat{\Pi} = 1)P(\Phi\hat{\Pi} = 1) = \\ &= -\left\{ P_a(1-D) \log \left[\frac{P_a(1-D)}{P(\Phi\hat{\Pi} = 0)} \right] + (1-P_a)(1-F) \log \left[\frac{(1-P_a)(1-F)}{P(\Phi\hat{\Pi} = 0)} \right] + \right. \\ &\quad \left. + P_a D \log \left[\frac{P_a D}{P(\Phi\hat{\Pi} = 1)} \right] + (1-P_a)F \log \left[\frac{(1-P_a)F}{P(\Phi\hat{\Pi} = 1)} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

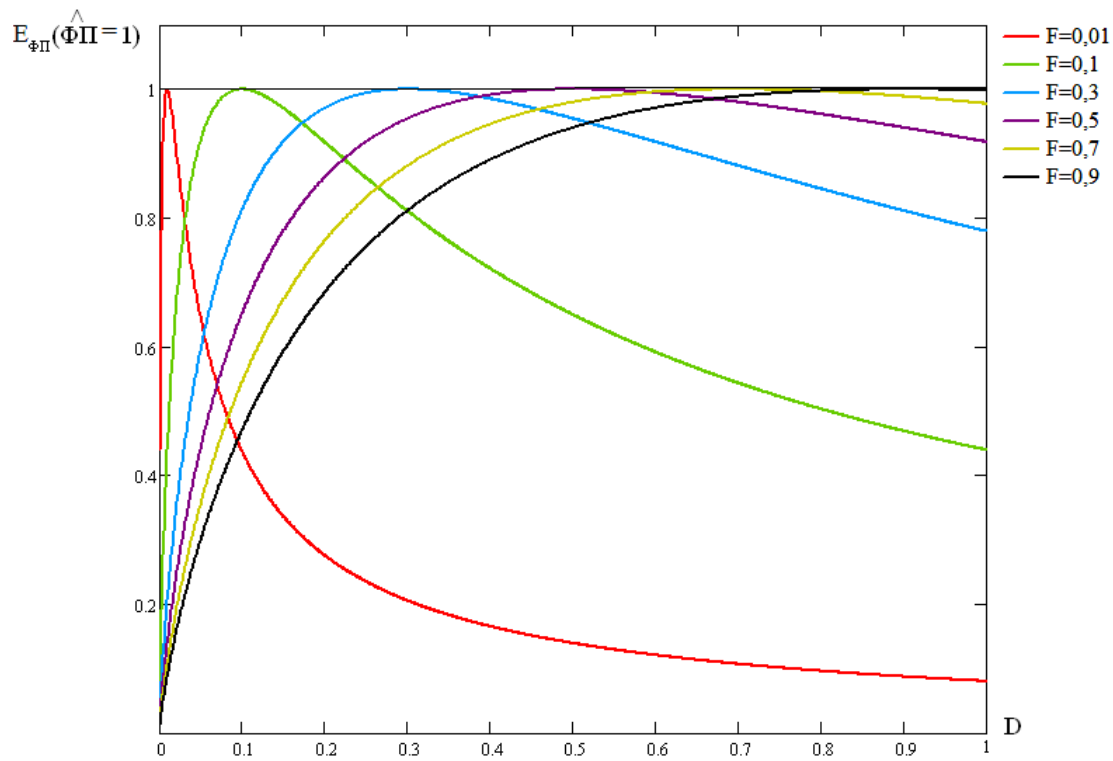


Рис. 1. Графическое представление условной энтропии $E_{\Phi\Pi}(\hat{\Phi\Pi}=1)$ от D при $P_a=0,5$

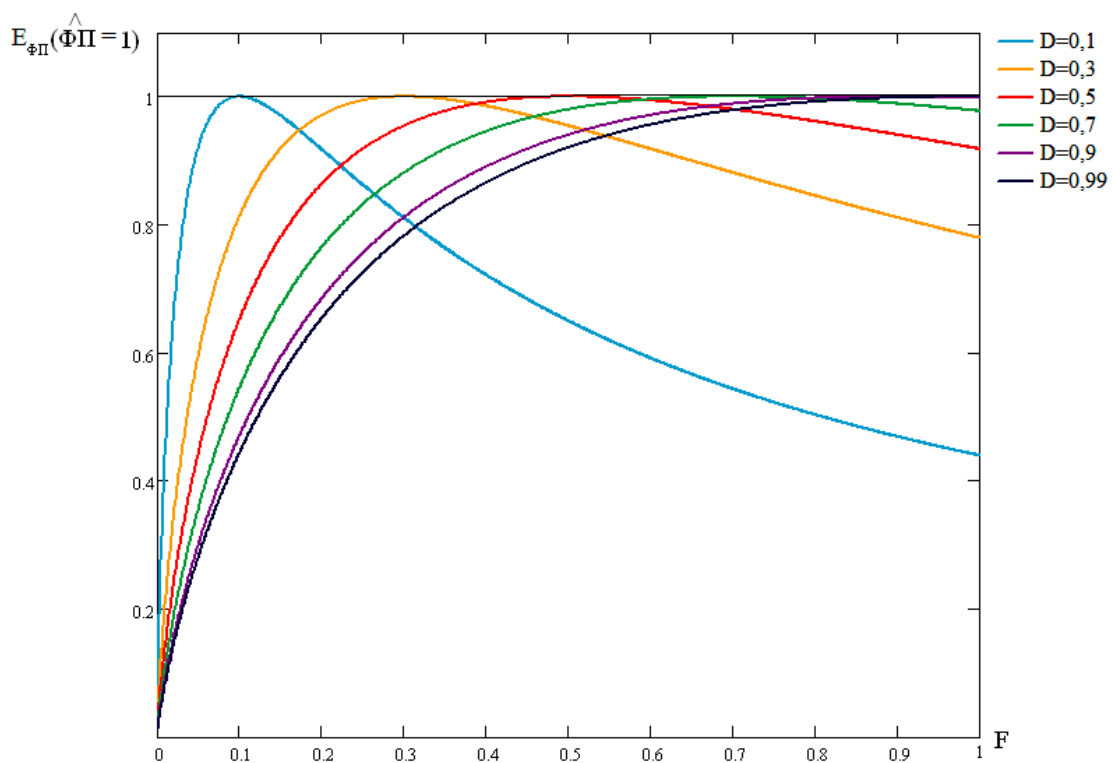


Рис. 2. Графическое представление условной энтропии $E_{\Phi\Pi}(\hat{\Phi\Pi}=1)$ от F при $P_a=0,5$

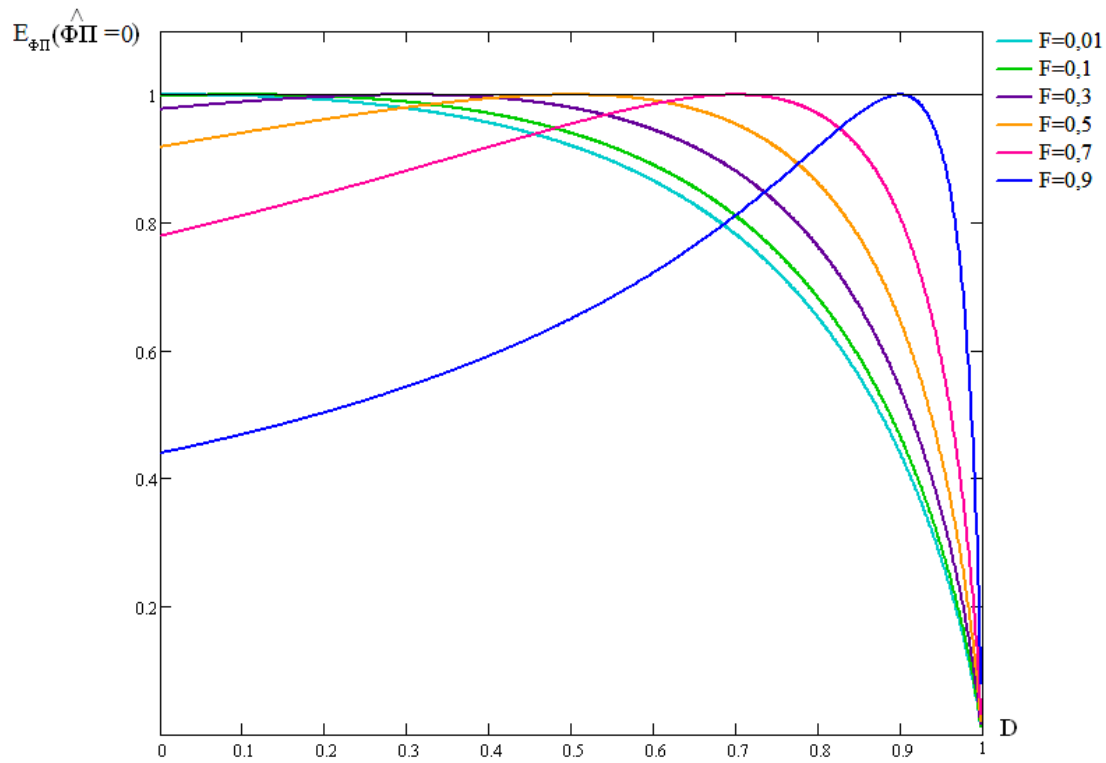


Рис. 3. Графическое представление условной энтропии $E_{\Phi\Pi}(\hat{\Phi\Pi}=0)$ от D при $P_a=0,5$

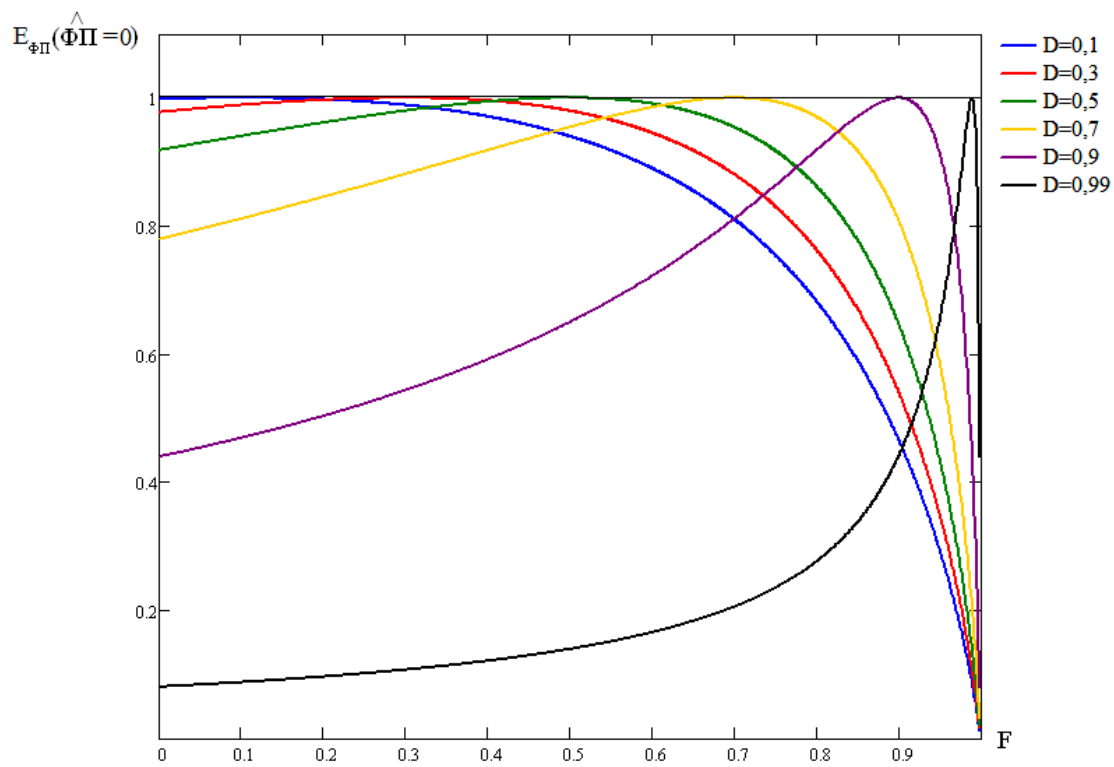


Рис. 4. Графическое представление условной энтропии $E_{\Phi\Pi}(\hat{\Phi\Pi}=0)$ от F при $P_a=0,5$

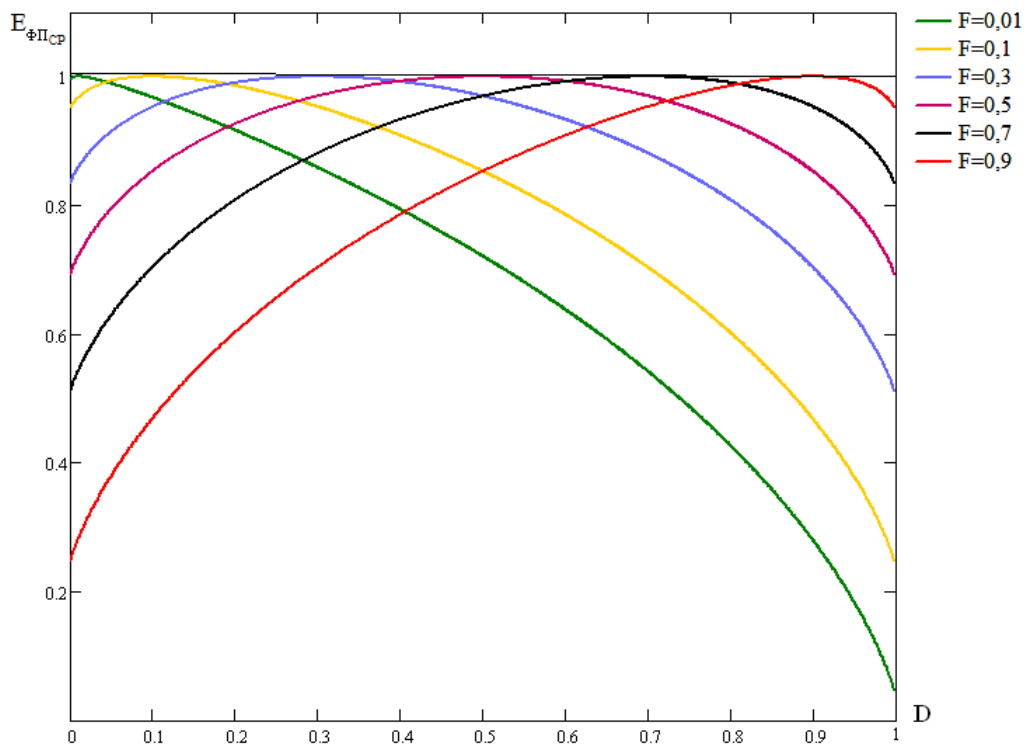


Рис. 5. Графическое представление средней энтропии $E_{\Phi\Pi_{CP}}$ от D при $P_a=0,5$

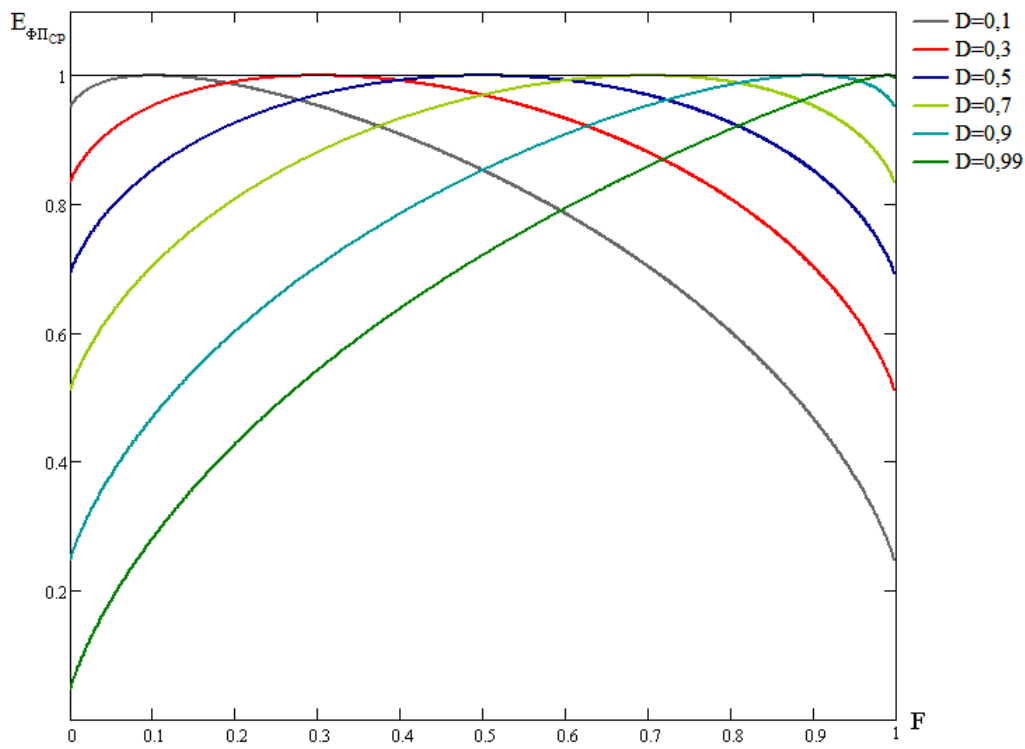


Рис. 6. Графическое представление средней энтропии $E_{\Phi\Pi_{CP}}$ от F при $P_a=0,5$

На рис.1 - 6 изображены рассчитанные в соответствии с (10), (11), (12) зависимости соответствующих энтропийных показателей от вероятностей D, F, P_a . Из графиков видно, что как условная, так и средняя энтропия принимают значения на $[0,1]$. Таким образом, показатели (10), (11), (12) создают удобную шкалу скрытности. Если значения $E_{\Phi\Pi}$ или $E_{\Phi\Pi}(\widehat{\Phi\Pi})$ близки к 0, то уровни неопределенности факта присутствия объекта по результатам его наблюдения низкие, решения о наличии или отсутствии объекта в виде оценок $\widehat{\Phi\Pi}$ обладают высокой степенью достоверности. При $E_{\Phi\Pi}=0$ или $E_{\Phi\Pi}(\widehat{\Phi\Pi})=0$ решения безошибочные. Если $E_{\Phi\Pi} \rightarrow 1$, то ситуация обратная, уровень достоверности получаемого изображения низкий. При $E_{\Phi\Pi}=1$ факт присутствия объекта в рассматриваемом элементе разрешения следует считать максимально неопределенным. Вторым выводом, следующий из представленных графиков, заключается в том, что введенные выше энтропийные показатели имеют экстремумы при некоторых значениях своих параметров, находящихся внутри области определения соответствующих функций либо на их границах. Учитывая, что вероятности D и F зависят от помех, действующих на прибор наблюдения, это обстоятельство позволяет сделать вывод о возможности постановки и решения задач оптимизации помехового противодействия обнаружению защищаемого объекта.

В случае когда измеряемый параметр объекта – непрерывный (дальность r , азимут β , угол места ε , скорость объекта v) соответствующие энтропийные показатели достоверности результатов наблюдения объекта, получаемые на основе (4), имеют вид:

$$\begin{aligned}
 E_r &= - \int_{r_{\text{нр}}}^{r_6} p(r/Y) \log(p(r/Y)) dr ; \\
 E_\beta &= - \int_{\beta_{\text{нр}}}^{\beta_6} p(\beta/Y) \log(p(\beta/Y)) d\beta ; \\
 E_\varepsilon &= - \int_{\varepsilon_{\text{нр}}}^{\varepsilon_6} p(\varepsilon/Y) \log(p(\varepsilon/Y)) d\varepsilon ; \\
 E_v &= - \int_{v_{\text{нр}}}^{v_6} p(v/Y) \log(p(v/Y)) dv .
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Из теории информации известно [5], что функционалы вида (13) принимают максимальные значения, когда фигурирующие в них апостериорные ПРВ соответствуют равновероятному распределению. Из сказанного следует, что, поскольку апостериорные

ПРВ, формируемые по результатам наблюдения, зависят от помех, действующих на наблюдателя, имеют смысл задачи оптимизации помехового подавления измерителя путем подбора соответствующих помех и их параметров. Оптимальная помеха действует на измеритель таким образом, что все значения измеряемого параметра в пределах отрезка $[x_n, x_k]$, анализируемого измерителем при формировании оценки этого параметра, становятся равновероятными. Подобные помехи относятся к дезинформирующим помехам искажающего действия. Вопросы о реализуемости и способах создания таких помех представляют самостоятельный интерес.

Заключение

Количественное описание достоверности результатов наблюдения возможно на основе информационных показателей, определяемых как энтропия апостериорных РВ измеряемых параметров, дискретных или непрерывных. Удобство такого описания состоит в том, что сложное понятие «достоверность измерения параметра» описывается количественно одним числовым показателем. В случае оценки дискретного параметра «факт присутствия объекта» предлагаемые энтропийные показатели принимают значения на $[0, 1]$, что создает удобную шкалу достоверности. Проведенный анализ показал, что предлагаемые показатели достоверности имеют экстремумы в пределах области определения соответствующих функций или на их границах. Это дает возможность постановки задач оптимизации, а также поиска возможностей реализации оптимальных решений путем подбора типов и параметров радиопомех, действующих на подавляемого наблюдателя.

Библиографический список

1. Перунов Ю.М., Фомичев К.И., Юдин Л.М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Под ред. Ю.М. Перунова. - М.: «Радиотехника», 2008г., 416 с.
2. Информационные технологии в радиотехнических системах: Учебное пособие / Васин В.А., Власов И.Б., Егоров Ю.М. и др.; Под ред. Федорова. И.Б. - М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003г., 672 с.
3. Фалькович С.Е. Хомяков Э.Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. - М.: Радио и связь, 1981 г., 286 с.

4. Юдин В.Н. Скрытность объектов от средств наблюдения. Скрытность факта присутствия объекта // «Вестник МАИ», т. 10, №1, 2003 г., с. 18-24.
5. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций. / Под ред. Свешникова А.А. – М.: Наука, 1965 г., 632 с.

Данная работа выполнена в рамках государственного контракта №07.514.12.4026 от 18 октября 2011г.

ЮДИН Василий Николаевич, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.
МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;
тел.: (499)158-68-39, (916)456-66-83; e-mail: mai@mai-trt.ru