

ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ОБНАРУЖЕНИЯ СКРЫТОЙ РАДИОЛИНИИ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА К ИНФОРМАЦИИ ОХРАНЯЕМОГО ОБЪЕКТА

А.И. Проскурин, Н.Ю. Юдина

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

В работе рассматриваются математические описания моделей обнаружения скрытой радиолинии. Задача обнаружения скрытой радиолинии может быть сформулирована как задача проверки статистических гипотез. Теория статистических решений определяет математическое ядро модели обнаружения скрытой радиолинии. Выбор конкретной математической модели зависит от объема априорной информации о сигнале и характере помех. Наиболее гибким и мощным инструментом для работы в условиях неопределенности являются методы машинного обучения.

Ключевые слова: сигнал, полосовой фильтр, сигнал-шум, байесовский классификатор, вектор признаков, Оптимальное решение.

REVIEW OF MODELS FOR DETECTING A HIDDEN RADIO LINK FROM UNAUTHORIZED ACCESS TO THE INFORMATION OF THE PROTECTED OBJECT

A.I. Proskurin, N.Y. Yudina

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

The paper discusses mathematical descriptions of models for detecting a hidden radio link. The problem of detecting a hidden radio link can be formulated as the problem of testing statistical hypotheses. Statistical decision theory defines the mathematical core of the hidden radio link detection model. The choice of a specific mathematical model depends on the amount of a priori information about the signal and the nature of the interference. Machine learning methods are the most flexible and powerful tool for working under uncertainty.

Keywords: Signal, bandpass filter, signal-to-noise, Bayesian classifier, feature vector, optimal solution.

Модель обнаружения скрытой радиолинии – это многоуровневая система, которая включает сбор исходной информации, ее предварительную обработку и фильтрацию. Кроме этого, рассматриваемая система включает анализ, выявление аномалий и реакцию на обнаружение. Для сбора данных используют сканирующие приемники, спектроанализаторы, антенны и пеленгаторы.

Модуль предварительной обработки включает базу данных легальных сигналов. Эти сигналы отфильтровываются в первую очередь. С целью уменьшения естественных помех производится подавление шумов, а затем выполняется сегментация данных.

Модуль анализа и выявления шумов – интеллектуальное ядро системы. Он использует алгоритмы: «пороговое обнаружение», «спектральный анализ», «анализ модуляции», «статистический анализ» и другие.

Модуль классификации и верификации позволяет сравнить данные с базой угроз. Наивысший приоритет получает угроза, которая располагается внутри охраняемой зоны.

Оповещение с указанием угрозы генерируется модулем реакции и отчетности. Модуль ведет протоколирование событий и данных, а также местоположение объекта наносится на карту.

Для математического описания модели будем использовать классическую теорию обнаружения сигналов. Задача обнаружения скрытой радиолинии может быть сформулирована как задача проверки статистических гипотез.

- 1) Полезный сигнал отсутствует, имеются только шумы и легальные помехи (гипотеза H_0).

$$x(t) = n(t) + i(t)$$

- 2) Полезный сигнал присутствует. Он наблюдается на фоне шума и помех (гипотеза H_1).

$$x(t) = s(t) + n(t) + i(t)$$

Здесь $x(t)$ – принятый сигнал;

$s(t)$ – сигнал скрытой радиолинии;

$n(t)$ – аддитивный белый гауссовский шум с нулевым средним и дисперсией σ_n^2 : $n(t) \sim N(0, \sigma_n^2)$;

$i(t)$ – совокупность легальных сигналов. Которые можно смоделировать и отфильтровать.

Самый простой метод (Энергетический детектор) основан на измерении мощности сигнала в определенной полосе частот. Здесь для выделения исследуемого диапазона Δf принятый сигнал $x(t)$ пропускается через полосовой фильтр с полосой, которая центрирована на частоте f_0 :

$$x_f(t) = \text{BPF}[x(t)]$$

На этапе предварительной обработки отфильтрованный сигнал возводится в квадрат и интегрируется в течении времени T для того, чтобы оценить его энергии:

$$E = \int_0^T |x_f(t)|^2 dt$$

Или в дискретной форме

$$E = \sum_{k=0}^{N-1} |x_f[k]|^2$$

где N – количество отсчетов за время T , а $x_f(t)$ – отсчеты отфильтрованного сигнала.

Решение о наличии скрытого сигнала принимается, используя полученное значение его энергии с пороговым γ . Если $E \geq \gamma$, то сигнал есть. При $E \leq \gamma$ сигнала нет.

Значение порогового значения γ выбирается из требуемой вероятности ложной тревоги P_{fa} . Вероятность ложной тревоги определяется

$$P_{fa} = P(E > \gamma | H_0) = 1 - F_{x_{2N}^2} \left(\frac{\gamma}{\sigma_n^2} \right)$$

где $F_{x_{2N}^2}$ – функция распределения χ^2 с $2N$ степенями свободы.

Зная желаемую вероятность, можно найти порог

$$\gamma = \sigma_n^2 \cdot F_{x_{2N}^2}^{-1}(1 - P_{fa}).$$

Вероятность правильного обнаружения зависит от отношения сигнал-шум. Если гипотезу H_1 статистика E имеет нецентрализованное распределение χ^2 с параметром не центральности $\lambda = E_s/\sigma_n^2$, где E_s – энергия сигнала $s(t)$.

$$P_d = P(E > \gamma | H_1) = 1 - F_{x_{2N\lambda}^2} \left(\frac{\gamma}{\sigma_n^2} \right)$$

где $F_{x_{2N\lambda}^2}$ – функция нецентрального распределения χ^2 .

К недостатка метода можно отнести низкую помехоустойчивость и неспособность отличить слабый сигнал от мощной помехи.

На современном этапе наибольшее применение находит модель обнаружения скрытых сигналов, которая строится на базе байесовских методов и машинного обучения. Она позволяет бороться с неизвестными параметрами и не гауссовскими помехами.

Ниже описан алгоритм, который основан на базе байесовского классификатора, включает векторизацию наблюдаемых данных, формулировку гипотез в пространстве признаков и применяется для принятия решения.

Для выполнения векторизации данных входной сигнал преобразуют в вектор признаков в том или ином варианте:

- 1) Вектор отсчетов спектра

$$X = [X_0, X_1, \dots, X_n]$$

где $X_i = |FFT([k])|_i$ – амплитуда на i -ой частотной бине;

- 2) Вектор статистических признаков

$X = [\mu, \sigma^2, skewness, kurtosis, \dots]$ – среднее, дисперсия, асимметрия, эксцесс и другие;

- 3) Вектор кепстаральных коэффициентов, который используется для анализа модулирующих сигналов.

После векторизации выполняется формулировка гипотез в пространстве признаков:

- 1) Вектор признаков $H_0: X \sim p_0(X)$, который распределен по закону характерному для легальных помех и шума;

- 2) Вектор признаков $H_1: X \sim p_1(X)$, распределен по закону, который характерен для скрытой радиолинии.

Оптимальное решение определяется минимизацией риска. При одинаковой стоимости ошибок решение сводится к отношению правдоподобия:

$$L(X) = \frac{p_1(X)}{p_2(X)} > \gamma$$

где γ – порог, который определяется на основе априорных вероятностей $P(H_0)$ и (H_1) и желаемых вероятностей ошибок.

Сводная математическая модель системы представляет собой каскад этапов:

- 1) На первом этапе осуществляется пространственно-временная обработка

$$X(f, t, 0) = STFT\{Beamforming[x(t)]\}$$

где *Beamforming* – обработка для усиления сигнала с направления «0»;

STFT – кратковременное преобразование Фурье для получения частотно-временного представления.

- 2) Вычисление частотно-временного сегмента признаков

$$\Phi = \varphi(X(f, t, 0))$$

- 3) Для каждого сегмента классификатор определяет бинарное решение $d_i \in \{0,1\}$.

- 4) Для снижения ложных тревог применяют последовательный критерий $S_k = S_{k-1} + \log L(\Phi_k)$.

Когда S_k выходит за верхний H_1 или нижний H_0 порог принимается решение. Таким образом, можно учитывать историю наблюдений.

Теория статистических решений определяет математическое ядро модели обнаружения скрытой радиолинии. Выбор конкретной математической модели зависит от объема априорной информации о сигнале и характере помех. Наиболее гибким и мощным инструментом для работы в условиях неопределенности являются методы машинного обучения.

Список литературы

1. Григорьев, Е. К. Основы радиолокации и ЛЧМ сигналов / Е. К. Григорьев. — М.: Радио и связь, 2009. — 320 с.
2. Канатчиков А.А. Сравнительный анализ методов обнаружения и определения параметров зондирующих сигналов РСА космического базирования. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.2>
3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. — 3-е изд. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 768 с.: ил. — (Учебная литература для вузов)
4. Юдина, Н.Ю. О программной реализации метода конечных элементов на примере двумерной задачи плоского напряженного состояния / Н.Ю. Юдина, А.В. Водяницкий // Моделирование систем и процессов. — 2018. — Т. 11, № 1. — С. 68-73.
5. Юдина, Н.Ю. Анализ факторов, оказывающих влияние на надежность структурных элементов сложных вычислительных систем / Н.Ю. Юдина, А.Н. Ковалев // Моделирование систем и процессов. — 2017. — Т. 10, № 3. — С. 86-93.
6. Криптографические алгоритмы Юдина Н.Ю., Лучников В.С., Высоцкий Д.М. В сборнике: Новые аспекты моделирования систем и

процессов. Материалы Международной научно-практической конференции. Отв. редакторы В.К. Зольников, А.И. Заревич. Воронеж, 2023. С. 247-255

References

1. Grigor'ev E. K. Osnovy radarokatsii i lchm signalov [Fundamentals of radar and light light signals]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 2009. - 320 p.
2. Kanatchikov A.A. Comparative Analysis of Methods for Detecting and Determining the Parameters of Space-Based SAR Sounding Signals. Zhurnal radioelektronika [electronic journal]. 2020. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.2>
3. Sergienko A.B. Digital Signal Processing: Textbook. allowance. - 3rd ed. St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2011. - 768 p.: ill. — (Educational literature for universities)
4. Yudina N.Yu., Vodyanitsky A.V. On the program implementation of the finite element method on the example of a two-dimensional problem of a plane stressed state / Yudina N.Yu., Vodyanitsky A.V. // Modeling of systems and processes. – 2018. – T. 11, No 1. – P. 68-73.
5. Yudina N.Yu., Kovalev A.N. Analysis of factors influencing the reliability of structural elements of complex computing systems. – 2017. – T. 10, No 3. – P. 86-93.
6. Cryptographic algorithms Yudina N.Yu., Luchnikov V.S., Vysotsky D.M. In the collection: New aspects of modeling systems and processes. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Holes. editors V.K. Zolnikov, A.I. Zarevich. Voronezh, 2023. pp. 247-255.