

ПРИМЕНЕНИЕ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СИГНАЛЬНО-ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

В.В. Аксенов, В.И. Павлов

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных
и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; avaks_68@bk.ru*

Ключевые слова и фразы: имитационные помехи; канал передачи информации; помехоустойчивость.

Аннотация: Предложен метод оценки сигнально-помеховой обстановки в условиях действия имитационных помех, основанный на байесовском подходе.

Развитие и масштабное распространение радиоэлектроники и систем связи положило начало разработке и применению новых методов радиоэлектронного противодействия со стороны третьих лиц, заинтересованных в нарушении целостности и достоверности передаваемой информации. Данные методы основаны, в частности, на применении имитационных помех (имитонападении) [1], позволяющих несанкционированно нарушать нормальное функционирование систем связи на информационном уровне. Возможности имитопомех, в силу постоянного распространения и автоматизации систем связи, непрерывно растут. Преднамеренно создаваемые имитационные помехи представляют чрезвычайную опасность системам связи и обслуживаемым объектам, влекут за собой информационные и материальные потери.

Перед защитой систем связи стоит сложная задача противодействия бурно развивающимся угрозам безопасности, создаваемым имитопомехами. Следовательно, безопасная или защищенная система – это система, обладающая в том числе средствами защиты, которые успешно и эффективно противостоят имитопомехам. Особую сложность в обеспечении противодействия угрозам безопасности имеют объекты рассредоточенной структуры, такие как магистральные трубопроводы (газопроводы, нефтепроводы и нефтепродуктопроводы), использующие технологические системы связи для функционирования автоматизированных систем управления и систем телемеханики. Исследование и развитие методов защиты от имитационных помех является приоритетным и востребованным направлением повышения помехоустойчивости технологических систем связи.

Пусть имеется система связи на основе цифровых радиорелейных станций (ЦРРС), образующих цепочки каналов передачи информации из оконечных, промежуточных и узловых станций, обеспечивающих поочередную передачу радиосигналов между оконечными станциями, антенны которых находятся в пределах прямой видимости, на расстоянии 30...70 км. Передача информации производится сигналами радиосвязи QPSK-модуляции в пакетном режиме в диапазонах радиочастотного спектра 394...410/434...450 МГц.

Предполагается, что свойства среды распространения радиосигналов и параметры каналов передачи информации постоянны при нормальных условиях

функционирования; внешние и внутренние шумы постоянны и малой интенсивности; каналы используются для передачи технологической и служебной информации; график сеансов связи между станциями известен и фиксирован во времени.

Третьими лицами с помощью средств радиотехнической разведки возможно длительное накопление информации о режиме связи в отдельном канале, используемых частотных диапазонах, типах сигналов, модуляции и пр. Данная информация может использоваться для формирования имитационных помех каналу передачи информации во время сеансов связи.

Процесс функционирования канала передачи информации в условиях организованных помех по своей физической сущности может быть представлен как радиоэлектронный конфликт, в котором, с одной стороны, участвуют средства радиосвязи (СРС), а с другой, – система радиоэлектронного противодействия (РЭП) третьих лиц, состоящая в общем случае из станции радиотехнической разведки (РТР) и непосредственно станции помех. На рисунке 1 в общем виде представлена структурная схема радиоэлектронного конфликта. Реализация случайного процесса на входе приемника канала передачи $y(t)$, в случае имитонападения, рассматривается как аддитивная смесь полезного сигнала $u_c(t, x_c, a_c)$, преднамеренной имитационной помехи $u_{\text{п}}(t, x_{\text{п}}, a_{\text{п}})$ и белого шума $u_{\text{ш}}(t)$

$$y(t) = u_c(t, x_c, a_c) + u_{\text{п}}(t, x_{\text{п}}, a_{\text{п}}) + u_{\text{ш}}(t). \quad (1)$$

В более простом случае отсутствия организованных помех – это смесь полезного сигнала $u_c(t, x_c, a_c)$ и белого шума $u_{\text{ш}}(t)$

$$y(t) = u_c(t, x_c, a_c) + u_{\text{ш}}(t), \quad (2)$$

где x_c и $x_{\text{п}}$ – векторы информационных параметров полезного и помехового сигналов соответственно; a_c и $a_{\text{п}}$ – векторы неинформационных параметров полезного и помехового сигналов соответственно.

Наблюдаемыми в дискретные моменты времени k являются n параметров выходных сигналов первичных измерителей приемника канала передачи информации, составляющих вектор z_k

$$z_k = c_k y_k + \zeta_k,$$

где k – текущий шаг счета, $k = \overline{1, K}$; n – порядковый номер параметра, $n = \overline{0, N}$; c_k – матрица дискриминационных характеристик размерности $n \times m$ при $m = \overline{0, L}$; ζ_k – n -мерный вектор шумов измерений.

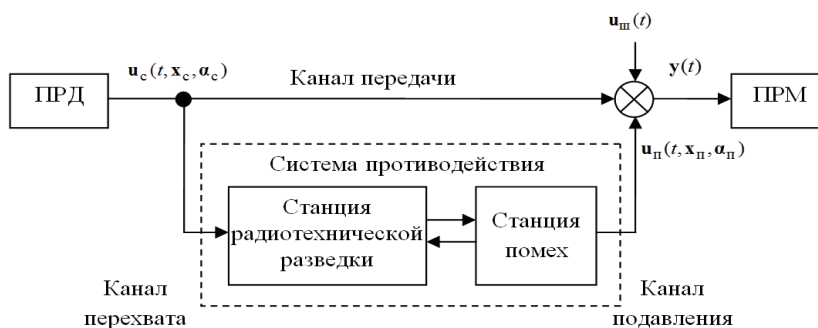


Рис. 1. Структурная схема радиоэлектронного конфликта: ПРД, ПРМ – передатчик и приемник канала передачи соответственно; $u_c(t, x_c, a_c)$ – полезный сигнал; $u_{\text{ш}}(t)$ – аддитивная помеха в виде белого шума; $u_{\text{п}}(t, x_{\text{п}}, a_{\text{п}})$ – имитационная помеха, излучаемая станцией РЭП; $y(t)$ – случайный процесс на входе приемника

Формулы (1) и (2) представляют собой рассматриваемые структуры случайного процесса $y(t)$, иные варианты взаимодействия компонентов сигнала в данной работе рассматриваться не будут. В зависимости от вариантов воздействия помех, в пределах рассматриваемых структур можно выделить i состояний канала передачи $i = \overline{0, I}$, образующих полную группу несовместных событий.

Для повышения помехоустойчивости систем связи требуется разработка алгоритма функционирования каналов передачи информации, обеспечивающего своевременное обнаружение фактов воздействия имитационных помех в принимаемом сигнале, оценку сложившейся в текущий момент времени сигнально-помеховой обстановки и адаптацию каналов передачи к сложившейся помеховой обстановке [2]. Рассмотрим только первые два вопроса, как наиболее важные.

Эффективностью разрабатываемого алгоритма будет во многом определяться быстротой обнаружения имитационных помех в принимаемой сигнальной совокупности. Повышение быстроты действия можно достичь за счет комплексирования информации от стохастически связанных источников.

Имитозащита большинства систем связи имеет весьма ограниченные возможности, так как при обнаружении помех в канале связи используются только последовательности наблюдаемых данных, содержащих передаваемую по каналу информацию, без привлечения дополнительных сведений. Однако во многих случаях наряду со слежением за информационной составляющей последовательности имеется возможность регистрации сопутствующих признаков, стохастически связанных с наблюдаемой последовательностью данных [3]. Сопутствующие признаки могут быть получены в том числе и из неинформационных параметров сигнала.

Так, при воздействии имитопомех в канале возникают динамические изменения угловых и амплитудных параметров сигнала. Наиболее устойчивыми являются амплитудные признаки и, в случае постоянных параметров канала, зависят только от уровня полезного сигнала, величина которого, как правило, соответствует устойчивому приему в условиях непреднамеренных помех, что обосновывает приоритет их выбора в качестве основного признака [4].

Контроль состояния и управление структурой канала связи можно производить с учетом информации индикаторов сопутствующих признаков [3], представляющих собой измерительные датчики с определенным порогом срабатывания. Таким образом, работа каждого индикатора будет описываться функцией из двух состояний

$$R = \begin{cases} 0, & \text{порог срабатывания не превышен;} \\ 1, & \text{порог срабатывания превышен.} \end{cases}$$

Обнаружение фактов воздействия помехи и оценка состояния сигнально-помеховой обстановки i может быть осуществлена в результате совместной обработки совокупности L индикаторных функций π , порождаемых воздействием на канал имитационной помехи

$$\pi_l(i_{k+1} | J_l, P_{Rl}, R_{lk}),$$

где $l = \overline{0, L}$ – номер одного из L индикаторов; i – состояние системы; k – текущий шаг счета, $k = \overline{1, K}$; J – входной сигнал индикатора; P_R – вероятность правильного обнаружения признака индикатором; R – выходной сигнал индикатора ($R = \overline{0, 1}$) и вектора параметров сигнала \mathbf{z}_k . Таким образом, дальнейшей обработке подвергается расширенный вектор $[\mathbf{z}_k, \pi_k]$.

Например, для сигнала с QPSK-модуляцией выберем семь индикаторов сопутствующих признаков (таблица).

**Определение состояния сигнально-помеховой обстановки
по информации выходных сигналов индикаторов**

<i>i</i>	<i>R_l</i>						
	<i>R₁</i>	<i>R₂</i>	<i>R₃</i>	<i>R₄</i>	<i>R₅</i>	<i>R₆</i>	<i>R₇</i>
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	0	1	0
3	0	1	1	1	1	1	0
4	0	1	1	1	0	1	1
5	0	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	0	1	0
7	1	1	1	1	1	1	0
8	1	1	1	1	0	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1

Примечание: *R₁* – уровень сигнала, дБ/мкВ; *R₂* – уровень биения амплитуды НЧ сигнала, дБ/мкВ; *R₃* – энергия сигнала на интервале времени, Дж; *R₄* – фазовый сдвиг, град; *R₅* – наличие сигналов на субчастотах; *R₆* – число ошибок при декодировании, 1/кбит; *R₇* – уровень аддитивного шума, дБ/мкВ.

Основываясь на физике процессов передачи информации электромагнитными волнами [4, 5] можно полагать, что увеличение уровня сигнала может быть вызвано действием других передатчиков в режиме передачи, в том числе и третьих лиц. Но данной информации не достаточно для полноценной оценки помеховой обстановки. В качестве дополнения можно использовать суммарную энергию принимаемого сигнала на заданном интервале времени. Для навязывания приемнику канала передачи ложного информационного символа, третьи лица вынуждены транслировать сигнал со сдвигом фазы, обеспечивающий, при сложении с полезным сигналом, принятие ложного символа. Это, в свою очередь, вызовет биение амплитуды принятого низкочастотного сигнала, о чем свидетельствует и большее отклонение фазы от номинальных значений. О действии помех свидетельствует и наличие сигналов на субчастотах и большее по сравнению с нормальным режимом функционирования число ошибок при декодировании. Обычно, постановка имитопомех сопровождается шумовыми помехами, что дает превосходство более мощным сигналам третьих лиц.

Весовые значения индикаторов сопутствующих признаков π_l назначаются экспертом на основании априорных данных и корректируются при отладке метода с использованием выборок экспериментальных данных.

Для сигналов с QPSK-модуляцией получены следующие весовые значения сопутствующих признаков:

$$\begin{aligned} \pi_1(i_{k+1} | J_1, P_{R1}, R_{1k} = 1) &= 0,71; & \pi_2(i_{k+1} | J_2, P_{R2}, R_{2k} = 1) &= 0,931; \\ \pi_3(i_{k+1} | J_3, P_{R3}, R_{3k} = 1) &= 0,84; & \pi_4(i_{k+1} | J_4, P_{R4}, R_{4k} = 1) &= 0,693; \\ \pi_5(i_{k+1} | J_5, P_{R5}, R_{5k} = 1) &= 0,62; & \pi_6(i_{k+1} | J_6, P_{R6}, R_{6k} = 1) &= 0,49; \\ \pi_7(i_{k+1} | J_7, P_{R7}, R_{7k} = 1) &= 0,33. \end{aligned}$$

Для достижения поставленной цели необходимо разработать процедуру стохастической оценки сигнально-помеховой обстановки с учетом информации ин-

дикаторов сопутствующих признаков. Состояния сигнально-помеховой обстановки i могут быть стохастически оценены методом максимального правдоподобия. В зависимости от оценок наблюдаемых параметров сигнала \mathbf{z}_k и индикации сопутствующих признаков π_k , можно с определенной вероятностью судить о сигнально-помеховой обстановке.

Оценку максимального правдоподобия следует производить для всех состояний, составляющих полную группу несовместных событий, в целях выявления наиболее вероятной.

Для оценки вероятностей удобно использовать формулу Байеса. Пусть, на основе статистических данных, имеются априорные вероятности $p(i)$ о соответствии векторов \mathbf{z}_k и π_k заранее определенным состояниям при $i = \overline{0, I}$. Обозначим через B событие, заключающееся в том, что на $(k+1)$ -м шаге счета действует имитационная помеха. Выдвинем гипотезы H_i , ($i = \overline{0, I}$) в пользу соответствующих состояний сигнально-помеховой обстановки i . Апостериорная вероятность $p(B|i)$ может быть получена как

$$p(B|i) = \prod_1^N p(z_n). \quad (3)$$

Допуская, что все параметры z_n вектора \mathbf{z}_k , подлежащие оценке, имеют нормальный закон распределения, апостериорная вероятность для каждого n -го параметра может быть представлена в виде

$$p(z_n) = \exp\left(-\frac{(z_n - M_n)^2}{2\sigma_n^2}\right), \quad (4)$$

где M_n – математическое ожидание z_n ; σ_n – среднеквадратическое отклонение z_n .

На основании (3) и (4), получим вероятности гипотез на $(k+1)$ -м шаге счета

$$p(i|B)_{k+1} = \frac{p(i) \prod_1^L \pi_{li} \prod_1^N \exp\left(-\frac{(z_n - M_{ni})^2}{2\sigma_{ni}^2}\right)}{\sum_0^I p(i) \prod_1^L \pi_{li} \prod_1^N \exp\left(-\frac{(z_n - M_{ni})^2}{2\sigma_{ni}^2}\right)}. \quad (5)$$

Для сигналов с QPSK-модуляцией выберем в качестве наблюдаемых параметров фазу φ_k , как основной информационный параметр, и амплитуду A_k , тогда формула (5) примет вид

$$p(i|B)_{k+1} = \frac{p(i) \pi_1 \pi_2 \pi_3 \exp\left(-\frac{(A_k - M_A)^2}{2\sigma_A^2}\right) \pi_4 \pi_5 \pi_6 \pi_7 \exp\left(-\frac{(\varphi_k - M_\varphi)^2}{2\sigma_\varphi^2}\right)}{\sum_1^I p(i) \pi_1 \pi_2 \pi_3 \exp\left(-\frac{(A_k - M_A)^2}{2\sigma_A^2}\right) \pi_4 \pi_5 \pi_6 \pi_7 \exp\left(-\frac{(\varphi_k - M_\varphi)^2}{2\sigma_\varphi^2}\right)}. \quad (6)$$

Весовые значения индикаторов сопутствующих признаков π_l учитываются в формуле (6) только в случае «срабатывания» соответствующего индикатора, увеличивая «вес» в пользу той или иной гипотезы. Значения π_l обеспечивают более резкое изменение вероятностей состояний сигнально-помеховой обстановки канала передачи информации. В целом, эффективность (6) будет определяться скоростью смены состояний i при изменении сигнально-помеховой обстановки (рис. 2).

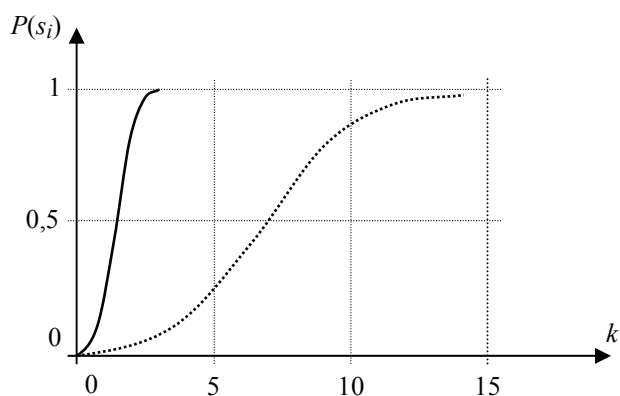


Рис. 2. Изменение вероятности при смене состояний сигнально-помеховой обстановки

На рисунке 2 сплошной линией показана траектория изменения вероятности, оцениваемой по формуле (6), пунктирной линией – траектория изменения вероятности, оцениваемой по формуле (6), но без учета сопутствующих признаков. Анализ эффективности разработанной процедуры показал увеличение быстродействия смены состояний в среднем на 60–70 %.

Разработанная процедура оценки сигнально-помеховой обстановки позволяет сократить время обнаружения фактов воздействия имитационных помех и оценить сигнально-помеховую обстановку за счет информации индикаторов сопутствующих признаков и неинформативных, в смысле извлечения передаваемой информации, параметров сигнала.

Учет рассмотренной особенности в алгоритме функционирования канала передачи представляет собой скрытый резерв повышения помехоустойчивости системы связи в целом.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 12-08-00352-а.

Список литературы

1. Аксенов, В.В. Системы передачи информации в условиях действия имитационных помех. Проблемы и перспективы / В.В. Аксенов // Военно-воздушные силы – 100 лет на страже неба России: история, современное состояние и перспективы развития : сб. материалов докл. Всерос. науч.-практ. конф., г. Воронеж, 16–17 мая 2012 г. : в 3-х ч. / Воен. авиац. инженер. ун-т. – Воронеж, 2012. – С. 199–200.
2. Аксенов, В.В. Концептуальное моделирование канала передачи информации, подверженного имитонападению / В.В. Аксенов // Научные чтения им. А.С. Попова : материалы докл. регион. науч.-практ. конф. курсантов, студентов, молодых ученых, посвящ. Дню образования войск связи, г. Воронеж, 16 окт. 2012 г. / ВУНЦ ВВС «Воен.-воздушная акад. им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». – Воронеж, 2012. – С. 120–121.
3. Павлов, В.И. Оптимальное обнаружение изменения свойств случайных последовательностей по информации измерителя и индикатора / В.И. Павлов // Автоматика и телемеханика. – 1998. – № 1. – С. 54–59.
4. Муромцев, Ю.Л. Практическая устойчивость систем оптимального управления / Ю.Л. Муромцев, Д.Ю. Муромцев, В.В. Орлов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2000. – Т. 6, № 3. – С. 387–392.

5. Муромцев Д.Ю. Анализ и синтез радиосистем на множестве состояний функционирования / Д.Ю. Муромцев, Ю.Л. Муромцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 241–251.

**Application of Bayesian Approach
to Evaluate the Signal-Interference Situation
in Information Transfer Channel of Processing Communication System**

V.V. Aksenov, V.I. Pavlov

*Department «Designing Electronic and Microprocessor Systems», TSTU;
avaks_68@bk.ru*

Key words and phrases: imitating hindrances; information transfer channel; noise stability.

Abstract: The paper describes method for evaluating a signal-interference situation under the action of interference simulation based on the Bayesian approach.

**Anwendung des Herangehens von Bajessowski für die Einschätzung
der signalstörenden Lage des Informationskanals des technologischen
Systems der Verbindung**

Zusammenfassung: Es ist die Methode der Einschätzung der signalstörenden Lage unter den Bedingungen der Handlung der Imitationstörungen, die auf dem Bajessowski Herangehen gegründet ist, vorgeschlagen.

**Application de l'approche de Bayes pour l'évaluation de l'entourage
de signal et d'erreur du canal de la transmission de l'information
du système informatique de liaison**

Résumé: Est proposée la méthode de l'évaluation de l'entourage de signal et d'erreur dans les conditions de l'action des erreurs des imitations fondée sur l'approche de Bayes.

Авторы: *Аксенов Виктор Владимирович* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Павлов Владимир Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Зырянов Юрий Трифонович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».