

УДК 519.724:629.783

ОЦЕНКА ИМИТОСТОЙКОСТИ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

Р.В. ИВАНОВ

(Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Санкт-Петербург)

Проведены исследования оптимальной модели оценки имитостойкости каналов управления беспилотными летательными аппаратами. Представлены результаты расчета вероятности ошибки в зависимости от длительности интервалов совпадения структурной помехи с сигналом. Предложены рекомендации по практическому использованию результатов оценки имитостойкости каналов управления.

Ключевые слова: частотная модуляция, структурные помехи, имитостойкость каналов управления.

Введение. В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) активно применяются для выполнения различных задач в интересах силовых ведомств. По своей сути БПЛА представляет собой робот, управляемый посредством радиоканала. Как правило, в качестве управляющих воздействий используют бинарные команды, передаваемые в течение заданного временного интервала, что позволяет в качестве модуляционного формата чаще применять сложные сигнальные конструкции, в основе которых лежит частотная модуляция [1].

Поскольку БПЛА выполняют задачи, находясь на достаточно приличном удалении от своих пунктов управления, то наиболее эффективным способом борьбы с ними является деструктивное воздействие на их каналы управления. Основным методом такого воздействия, согласно [2], является энергетическое подавление, которое сводится к постановке прицельных или заградительных помех шумового характера. Однако такой вид воздействия легко идентифицируется, что позволяет современным БПЛА специального назначения своевременно переходить в автономный режим работы [1].

Именно поэтому специалисты радиоэлектронной борьбы считают, что в большинстве случаев наиболее эффективным является воздействие на каналы управления БПЛА посредством структурных помех, позволяющих в худшем случае нарушить процесс доведения команды, а в лучшем – обеспечить перехват управления с последующей экстренной посадкой аппарата или его самоуничтожением. Воздействие посредством структурных помех определим как имитовоздействие. Основным достоинством имитовоздействий является отсутствие явных признаков подавления, что существенно затрудняет своевременное принятие мер помехозащиты, даже с учетом применения достаточно продуктивных методов распознавания, широко рассматриваемых в литературе [3, 4].

Таким образом, постановку структурных помех каналу управления, приводящих к имитонавязыванию, можно отнести к одному из наиболее опасных видов деструктивного воздействия на БПЛА.

Проблема имитонавязывания достаточно подробно рассмотрена в [2, 5]. Однако затрагиваемые в указанных работах вопросы в большей степени касались информационных радиоканалов. Настоящая статья посвящена исследованию имитостойкости именно каналов управления, использующих сигнальные конструкции на основе частотной модуляции.

Модель оценки имитостойкости каналов управления. К выбору модели оценки имитостойкости каналов целесообразно подойти с позиций криптографической защиты информации [6], согласно которым наибольший уровень неопределенности возникает в том случае, если изменение возможных состояний канала происходит по равномерному закону. В этом случае обеспечивается максимальная степень имитозащищенности. И вероятность имитонавязывания $p_{им}$ при разовой попытке за время существования установившегося состояния $T_{см}$ будет обратно пропорциональна общему числу состояний $\Omega_{общ}$.

На практике каждое из состояний характеризуется совокупностью параметров, к основными из них относятся текущее значение частоты и соответствующее ей количество допустимых кодовых комбинаций (сигнатур). Указанную комбинацию определим как единичное подпространство параметров $\Omega_{ед}$. Тогда искомая вероятность имитонавязывания $\tilde{p}_{им}$ будет определяться отношением $\Omega_{ед}$ к общему числу таких возможных состояний $\Omega_{общ}$, которое с учетом их независимости в частотном и сигнатурном подпространствах радиоканала может определяться следующим выражением:

$$\tilde{p}_{им} = \frac{\Omega_{ед}}{\Omega_{общ}} = \frac{F_{ед} S_{ед}}{F_{общ} S_{общ}}, \quad (1)$$

где $S_{ед}$ – число комбинаций сигнатуры системы, соответствующее единичному состоянию радиоканала $\Omega_{ед}$;

$F_{\text{ед}}$ – число состояний вектора в частотном подпространстве $\Omega_{F_{\text{ед}}}$, соответствующее единичному состоянию радиоканала;

$S_{\text{общ}}$ – число возможных комбинаций сигнатуры системы;

$F_{\text{общ}}$ – число возможных реализаций вектора в частотном пространстве (дискретные значения диапазона рабочих частот).

На рисунке 1 показано сечение подпространства состояний радиоканала.

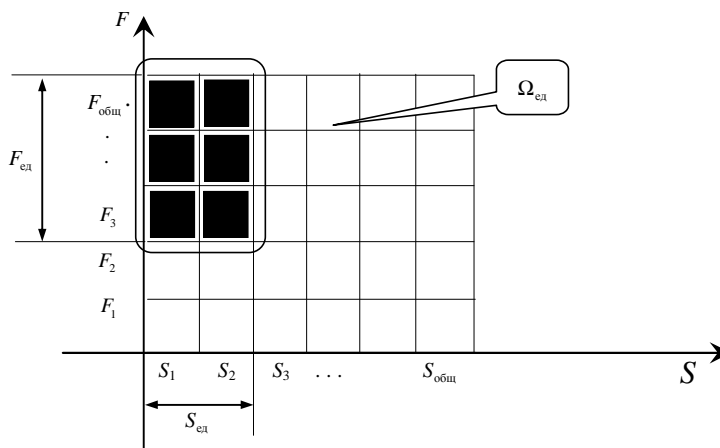


Рисунок 1 – Сечение пространства состояний радиоканала управления в некотором интервале времени T_i

Согласно выражению (1), чем больше число возможных состояний канала, тем ниже вероятность имитонавязывания и, соответственно, выше его имитостойкость. Однако такая оценка не всегда отражает реальную эффективность имитационного воздействия, так как существует возможность перебора всех возможных состояний, в результате которого в некоторых случаях при достаточно малых значениях $\tilde{p}_{\text{им}}$ реальная возможность имитации будет достаточно высокой.

Для анализа последствий имитонавязывания предлагается следующая модель, учитывающая особенности радиоканала управления и воздействующие на него имитационные помехи (рис. 2).

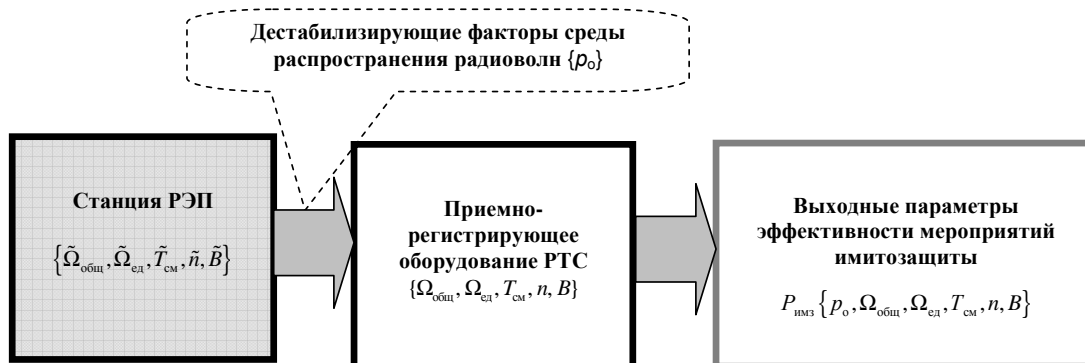


Рисунок 2 – Модель воздействия имитационных помех на радиоканалы управления БПЛА

Согласно представленной модели эффективность мероприятий имитозащиты определяется вероятностью $p_{\text{имз}}$, в которой, кроме множества состояний, учитывается время их смены ($T_{\text{см}}$), параметры радиоканала (n – длина синхропосылки, B – скорость манипуляции) и дестабилизирующие факторы среды распространения радиоволн ($p_о$ – вероятность ошибки приема бита информации).

Особенность любого канала управления состоит в ограниченности используемого в них частотно-сигнатурного ресурса, что связано с конечностью алфавита команд. Указанная особенность позволяет с достаточно высокой точностью $\tilde{\Omega}_{F,S} \rightarrow \Omega_{F,S}$ получить оценку границ всего частотно-сигнатурного

пространства в интересах применения сравнительно простых процедур поиска требуемого состояния, основанных на сканировании частотно-сигнатурного пространства $\Omega_{F,S}$.

Поскольку процесс имитационного воздействия представляет собою последовательное многоразовое сканирование пространства состояний $\Omega_{F,S}$, представленного простейшим потоком Бернулли, то при известных параметрах $\{\tilde{\Omega}_{\text{сист}}, \tilde{\Omega}_{\text{ед}}, \tilde{T}_{\text{см}}, \tilde{n}, \tilde{B}\} \rightarrow \{\Omega_{\text{сист}}, \Omega_{\text{ед}}, T_{\text{см}}, n, B\}$ среди бернуллиевых схем оптимальным является метод на основе гипергеометрической логики сканирования [2].

Оценка эффективности такого сканирования определяется известным выражением гипергеометрического распределения

$$H(\xi; K, \Omega_{\text{ед}}, \Omega_{\text{общ}}) = \binom{\Omega_{\text{ед}}}{\xi} \binom{\Omega_{\text{общ}} - \Omega_{\text{ед}}}{K - \xi} / \binom{\Omega_{\text{общ}}}{K} \quad (2)$$

со временем гарантированного выбора разрешенного состояния

$$T_{\text{гар}} = \frac{n}{B} (\Omega_{\text{общ}} - \Omega_{\text{ед}} + 1), \quad (3)$$

где $\Omega_{\text{ед}} = F_{\text{ед}} S_{\text{ед}}$ (в рассматриваемом случае $S_{\text{ед}}$ – число комбинаций сигнатуры системы, соответствующее единичному состоянию радиоканала; $F_{\text{ед}}$ – число состояний вектора в частотном подпространстве, соответствующее единичному состоянию радиоканала);

$\Omega_{\text{общ}} = F_{\text{общ}} S_{\text{общ}}$ ($S_{\text{общ}}$ – число возможных комбинаций сигнатуры системы; $F_{\text{общ}}$ – число возможных реализаций вектора в частотном пространстве (диапазон рабочих частот);

$K = \text{Int}[BT_{\text{ИП}}/n]$ – целое число попыток сканирования, определяемое временем воздействия имитационной помехи $T_{\text{ИП}} < T_{\text{гар}}$, скоростью манипуляции B и длиной синхропосылки сигнала n ;

ξ – необходимое число попаданий на разрешенные состояния за время имитационного воздействия, требуемое для эффективного имитонавязывания тем или иным способом.

Таким образом, разработанная модель (выражения (1)–(3) позволяет заключить, что в ходе наблюдений за БПЛА предоставляется возможность определения совокупности всех возможных сигнатур, т.е. вскрытия алфавита команд. Следовательно, единственным вариантом противодействия имитонавязыванию является внесение случайного характера в порядок смены текущего состояния радиоканала управления БПЛА.

Исследование имитостойкости каналов управления, использующих сигнальные конструкции на основе частотной модуляции. Для оценки имитостойкости каналов управления при условии априорного знания текущей сигнатуры противоборствующей стороной проведем аналитическое исследование.

Предположим, что сам процесс деструктивного воздействия будет заключаться в подмене истинного сигнала помехой [2]. Причем для бинарных каналов, наиболее широко применяющихся на практике, имитонавязывание будет заключаться в изменении значения демодулированного символа в соответствии со структурной помехой. Следовательно, при частотной модуляции структурная помеха должна обеспечить требуемый уровень излучения в канале демодулируемого символа, противоположного передаваемому в тот же момент времени управляющим сигналом.

С позиций системы имитонавязывания для придания деструктивного характера воздействия на решающем элементе демодулятора в канале управления должна создаваться ситуация, при которой демодулируемые символы носят или случайный характер [7], или же, в идеальном случае, соответствуют комбинации, навязываемой структурной помехой.

Между тем на практике для каналов с частотной модуляцией используется некогерентное детектирование, согласно [6, 8], обеспечивающее вероятность битовой ошибки, вычисляемое по формуле

$$P_B = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_B}{2N_0}\right). \quad (4)$$

где E_B – энергия, приходящаяся на бит (для бинарных передач – на символ);

N_0 – спектральная плотность мощности шума (в рассматриваемой ситуации – спектральная плотность мощности структурной помехи).

Очевидно, что главной проблемой эффективной постановки структурной помехи является обеспечение ее тактовой синхронизации с сигналом управления, обусловленной как разностью между дистанциями связи и подавления, так и априорными знаниями о битовой структуре самой команды, передаваемой в данный момент времени.

Для учета данной особенности введем понятие коэффициента временного несовпадения структурной помехи и сигнала на входе демодулятора ρ , который лежит в пределах $\rho \in [0; 1]$. Тогда $\rho = 1$ будет соответствовать условиям передачи помехой символа, противоположного передаваемого сигналом управления в пределах тактового интервала, другими словами, создавать условия, при которых решающее устройство работает случайным образом, а при $\rho = 0$ – соответствовать условиям передачи помехой символа, полностью совпадающего с передаваемым управляющим сигналом, т.е. будет способствовать его достоверному приему.

Тогда для системы радиоэлектронного подавления наилучшая ситуация наступит в случае равенства энергии структурной помехи E_{Π} и энергии, приходящейся на бит E_B , передаваемой управляющим сигналом при выполнении условия $\rho = 1$.

$$E_{\Pi} = E_B. \quad (5)$$

Действительно, равенство (5) должно приводить к полной неопределенности на входе решающего устройства демодулятора на борту БПЛА.

С учетом указанных замечаний выражение (4) можно преобразовать к следующему виду:

$$P_B = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_B + (1 - 2\rho)E_{\Pi}}{2N_0}\right). \quad (6)$$

Таким образом, формула (6) представляет собой модель оценки вероятности ошибки в канале с частотной модуляцией в условиях воздействия оптимальной по структуре и энергии имитационной помехи.

При постановке имитационных помех основные проблемы эффективности их применения обусловлены только вопросами тактовой синхронизации с управляющими сигналами, которые в модели (6) учитываются посредством параметра ρ . При $\rho = 1$ имеем $P_B = 0,5$, что характеризует полную неопределенность на решающем устройстве демодулятора. Напротив, при $\rho = 0$ происходит суммирование энергии сигнала и помехи, повышающее достоверность принятия правильного решения.

На рисунке 3 представлена зависимость вероятности битовой ошибки P_B от значения параметра ρ при исходных значениях отношения энергии символа сигнала управления к спектральной плотности мощности шума (ОСШ) $h_1^2 = E_B/N_0 = 10$ дБ и $h_2^2 = E_B/N_0 = 15$ дБ.

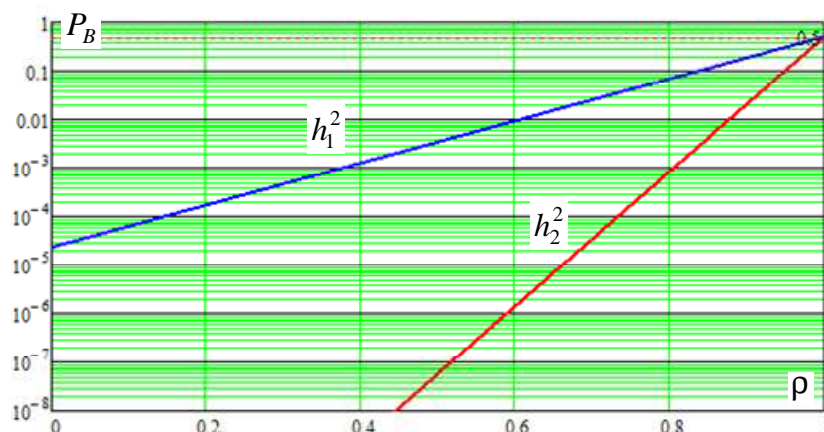


Рисунок 3 – Зависимость вероятности битовой ошибки от значения коэффициента временного несовпадения структурной помехи и сигнала при различных значениях ОСШ

Анализ результатов, представленных на рисунке 3, показывает, что имитонавязывание во многом определяется текущим значением ОСШ. Так, чем ниже исходное значение ОСШ, тем хуже эффективность имитонавязывания при том же значении коэффициента временного несовпадения. В подтвержде-

ние данного заключения на рисунке 4 представлены результаты зависимости вероятности битовой ошибки P_B от ОСШ при различных значениях ρ .

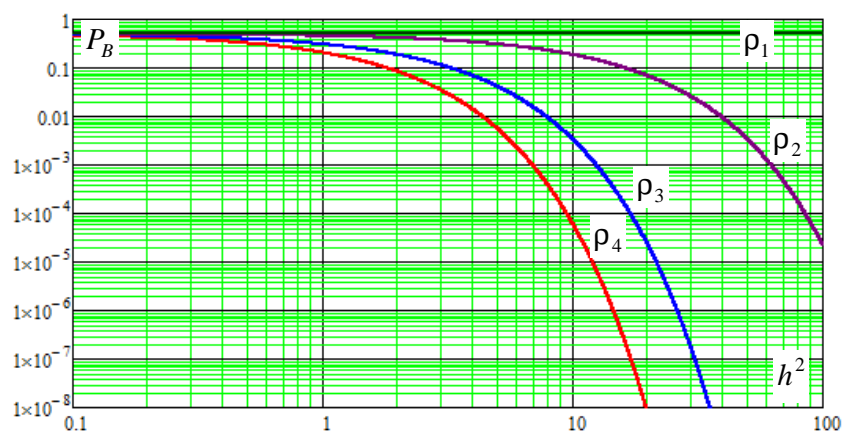


Рисунок 4 – Зависимость вероятности битовой ошибки от ОСШ при различных значениях коэффициента временного несовпадения

На рисунке 4 показана зависимость вероятности битовой ошибки при $\rho_1 = 1$; $\rho_2 = 0,9$; $\rho_3 = 0,5$ и $\rho_4 = 0,1$.

Таким образом, имитонавязывание зависит от тактового совпадения помехи и сигнала. Имитационная помеха по своей структуре аналогична полезному сигналу, следовательно для противоположных символов она создаст условие неопределенности, а для совпадающих, наоборот, улучшит их энергетику. Указанные обстоятельства позволяют, используя высокоточные методы обнаружения, например описанные в [9–11], обеспечить измерение различий уровней амплитуды сигнала на длительности тактового интервала и косвенным методом оценить степень имитонавязывания.

Заключение. Проведенные исследования показали, что при использовании конечного алфавита команд с течением времени противоборствующая сторона в конечном итоге по результатам наблюдения сможет в большинстве случаев предсказать текущее значение сигнатуры. Следовательно, единственным вариантом противодействия имитонавязыванию является снижение детерминированной составляющей в порядке смены состояний радиоканала. В этом случае имитонавязывание может быть сведено к процессу деструктивного воздействия, при котором принятие решения при демодуляции получает случайный характер.

В результате реализация процедур эффективного имитонавязывания будет связана с определенными сложностями не только по формированию помех заданной частотно-временной структуры, но и обеспечению их согласованности по уровню и тактовой синхронизации с сигналами управления на входе бортовых демодуляторов БПЛА.

При этом эффективность имитонавязывания как процедуры, существенно зависящей от коэффициента временного несовпадения структурной помехи и сигнала, значительно снижается с уменьшением текущего значения ОСШ. Таким образом, продуктивной мерой, позволяющей избежать имитонавязывания, может явиться установка на входе демодулятора индикатора уровня принимаемого сигнала. При превышении его значения, определяемого допустимым дисперсионным разбросом, рационально БПЛА автоматически переводить в автономный режим.

Кроме того, целесообразно использовать сигналы с различными тактовыми интервалами на длительности команды, изменяемыми случайным образом, или же использовать сигналы сложных конструкций [12, 13].

Дальнейшие исследования, по нашему мнению, связаны с оперативным решением вопросов обнаружения самого факта деструктивного воздействия структурных помех на каналы управления БПЛА, а также с применением методов совместной частотно-временной обработки при принятии решения, показавших приемлемые результаты при обработке сложных процессов [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Точилов, Л. Системы управления БЛА [Электронный ресурс] / Л. Точилов. – 2016. – Режим доступа: http://www.ispl.ru/Sistemy_upravleniya-BLA.html. – Дата доступа: 25.02.2016.

2. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / В.Г. Радзиевский [и др.] ; под ред. В.Г. Радзиевского. – М. : Радиотехника, 2006. – 424 с.
3. Способ распознавания радиосигналов : пат. 2261476 РФ, МПК G 06K 9/00 / В.А. Аладинский, С.В. Дворников, А.М. Сауков, А.Н. Симонов ; дата публ.: 27.09.2005.
4. Способ распознавания радиосигналов : пат. 2356064 РФ, МПК G 01S 7/00 / С.В. Дворников, А.С. Дворников, С.Р. Желнин, И.Н. Оков, А.М. Сауков, А.Н. Симонов, А.Ф. Яхеев ; дата публ.: 20.05.2009.
5. Орошук, И.М. Оценка имитостойкости радиоканала с замираниями при использовании сигналов с частотной манипуляцией / И.М. Орошук // Радиотехника. – 2004. – № 11. – С. 12–18.
6. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр ; пер. с англ. – 2-е изд. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2007. – 1104 с.
7. Демодуляция сигналов ОФТ на основе адаптивного порога / С.В. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. – 2013. – № 2. – С. 90–97.
8. Рябенко, Д.С. Обоснование оптимального сигнала для оценки защищенности цифровых каналов утечки информации / Д.С. Рябенко, В.К. Железняк // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2013. – № 12 – С. 2–8.
9. Дворников, С.В. Метод обнаружения на основе посимвольного перемножения реализаций спектра наблюдаемого процесса с автоматическим расчетом порога принятия решения / С.В. Дворников // Научное приборостроение. – 2004. – Т. 14, № 4. – С. 92–97.
10. Метод обнаружения радиосигналов на основе обработки их частотно-временных распределений плотности энергии / С.В. Дворников, В.К. Железняк, В.Ф. Комарович, Р.Н. Храмов / Информация и космос. – 2005. – № 4. – С. 13–16.
11. Дворников, С.В. Метод обнаружения сигналов диапазона ВЧ на основе двухэтапного алгоритма принятия решения / С.В. Дворников // Научное приборостроение. – 2005. – Т. 15, № 3. – С. 114–119.
12. Описание сигналов в базисах функций сплайн-Вилленкина – Кристенсона / С.Н. Агиевич, С.В. Дворников, А.С. Гусельников // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 3. – С. 52–57.
13. Синтез манипулированных сигналов на основе вейвлет-функций / С.В. Дворников, С.С. Дворников, А.М. Спиринов // Информационные технологии. – 2013. – № 12. – С. 52–55.
14. Применение методов частотно-временной обработки акустических сигналов для анализа параметров реверберации / А.А. Алексеев [и др.] // Научное приборостроение. – 2001. – Т. 11, № 1. – С. 65–76.

Поступила 02.03.2016

RESISTANCE SIMULATION OF PILOTLESS VEHICLE CONTROL CHANNEL ESTIMATION

R. IVANOV

The optimum model of a resistance simulation of pilotless vehicle control channel is investigated. Results of calculation of error probability depending on duration of intervals of coincidence of a structural jamming with a signal are represented. Guidance on practical usage of results of resistance simulation of control channels estimation is offered.

Keywords: *frequency modulation, structural jamming, resistance simulation control channel.*