

Фрагментированная передача информации в служебных каналах управления беспилотными летательными аппаратами

И. А. Козин, Я. О. Саклаков

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

Аннотация. Для повышения надежности управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА) необходимо включение в контур управления ими наряду с основным полнофункциональным каналом управления, дополнительного служебного канала управления. Функциями служебного канала является передача на БЛА формализованных сообщений в сложных условиях радиосвязи и нештатных ситуациях. В качестве таких формализованных сообщений могут выступать отдельные особо важные команды управления аппаратурой БЛА, сигналы вызова для возобновления связи с БЛА после ее потери, числовые команды (коды) для синхронизации каналообразующей аппаратуры. Для этих условий необходим выбор специальных методов канального кодирования и передачи формализованных сообщений, обеспечивающих высокую надежность и достоверность их доставки до БЛА. В качестве такого метода в настоящей работе рассматривается метод фрагментированной передачи сообщений с возможностью восстановления переданного сообщения по ограниченному числу принятых фрагментов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; фрагментированная передача; радиосвязь, достоверность

I. ВВЕДЕНИЕ

Для повышения надежности управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА) необходимо включение в контур управления ими наряду с основным полнофункциональным каналом управления, [1, 2], дополнительного служебного канала управления. Функциями служебного канала является передача на БЛА формализованных сообщений в сложных условиях радиосвязи и нештатных ситуациях. В качестве таких формализованных сообщений могут выступать отдельные особо важные команды управления бортовой аппаратурой БЛА, сигналы вызова для возобновления связи с БЛА после ее потери, числовые команды (коды) для синхронизации каналообразующей аппаратуры. В обычном режиме управления БЛА служебный канал является резервным по отношению к основному каналу управления.

Функции служебного канала может выполнять канал информационного обмена с БЛА или для их реализации в аппаратуре БЛА может включаться дополнительная аппаратура служебного канала. При этом технические решения и характеристики служебного канала управления БЛА при любом варианте его реализации должны быть ориентированы на надежную передачу относительно небольшого количества формализованных сообщений в сложных условиях радиосвязи, в том числе при малых отношениях сигнал/шум в прямом канале и отсутствии обратного

канала информационного обмена с БЛА. Для этих условий необходим выбор специальных методов канального кодирования и передачи формализованных сообщений, обеспечивающих высокую надежность и достоверность их доставки до БЛА. В качестве такого метода в настоящей работе рассматривается метод фрагментированной передачи сообщений с возможностью восстановления переданного сообщения по ограниченному числу принятых фрагментов.

II. ФРАГМЕНТИРОВАННАЯ ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Канальное кодирование сообщений с разделением на фрагменты, и фрагментированная передача с возможностью восстановления переданного сообщения по части принятых фрагментов является аналогом используемой в криптографии схемы разделения «секретов» [3, 4]. Однако если в криптографии разделение сообщения (обычно это пароль или ключ доступа) на фрагменты («секреты») используется для разграничения доступа к передаваемой или хранящейся в базах, данных информации, то при канальном кодировании фрагментированная передача сообщений используется в сочетании с корректирующими кодами и обеспечивает повышение надежности и достоверности доставки сообщений. При этом, с одной стороны, учитывается то обстоятельство, что эффективность корректирующих кодов уменьшается с увеличением длины сообщений и ухудшением условий связи [5, 6], с другой стороны, передача избыточного числа фрагментов, позволяющего восстановить переданное сообщение по части из них, обеспечивает повышение достоверности при обнаружении ошибок в отдельных фрагментах и их стирании.

При фрагментированной передаче каждое сообщение делится на W фрагментов, которые последовательно передаются по каналу связи. Для правильного приема сообщения необходимо правильно принять не менее V фрагментов ($V < W$). Предполагается, что существует некоторый алгоритм формирования W фрагментов сообщения такой что, при объединении V или более фрагментов можно восстановить в точности переданное сообщение, тогда как объединение менее чем V фрагментов сообщения не дает никакой информации о переданном сообщении. Такое правило восстановления сообщения по принятым его фрагментам называется схемой пороговой фрагментации (V, W). При плохих условиях связи, когда возможны ошибки при приеме сообщений, соотношение $W > V$ создает некоторый «запас» в количестве принятых фрагментов сообщения, поскольку из-за ошибок при передаче некоторые из них могут быть приняты неверно и стерт (исключены из

рассмотрения) при обнаружении ошибок используемым корректирующим кодом. Условия связи характеризуются вероятностью ошибочного приема информационного символа p_0 , которую можно полагать одинаковой для всех фрагментов.

Правило кодирования при фрагментированной передаче сообщений и использовании схемы пороговой фрагментации включает внутреннее правило кодирования фрагментов и внешнее правило кодирования сообщений, как совокупности фрагментов. Будем называть фрагменты передаваемого сообщения информационными блоками. Принципиальное значение для реализации рассматриваемого метода передачи сообщений является выбор внешнего кода, обеспечивающего восстановление переданного сообщения по части принятых информационных блоков. Правило кодирования такого внешнего кода строится на основе векторных или полиномиальных преобразований над элементами конечных полей. Их геометрическая интерпретация состоит в том, что любой многочлен степени $V-1$ однозначно восстанавливается по его значениям в V точках (например, по интерполяционной формуле Лагранжа). Если коды информационных блоков сообщения сопоставить значениям полинома, то можно восстановить сообщение, передаваемое W раз, по его V фрагментам.

В качестве внутреннего кода для повышения достоверности передачи фрагментов сообщения используется блочный корректирующий код с обнаружением ошибок. Каждый информационный блок передается с помощью n символов помехоустойчивого кода, обнаруживающего μ ошибок. При приеме информационных блоков осуществляется декодирование принятого кода с обнаружением ошибок. При правильном приеме всех символов передаваемого информационного блока происходит его правильный прием. При искажении в передаваемом информационном блоке от 1 до μ символов эти ошибки обнаруживаются, и информационный блок при приеме стирается. При искажении в передаваемом информационном блоке $\mu+1$ символов и более эти ошибки не обнаруживаются, и происходит неправильный (ложный) прием информационного блока.

При передаче информационных блоков двоичным кодом с обнаружением ошибок достоверность приема каждого информационного блока характеризуется следующими вероятностями:

- вероятностью правильного приема информационного блока

$$P_{nm} = (1 - p_0)^n, \quad (1)$$

- вероятностью обнаруживаемой ошибки при приеме информационного блока (вероятностью стирания информационного блока)

$$P_{cm} = \sum_{i=1}^{\mu} C_n^i p_0^i (1 - p_0)^{n-i}, \quad (2)$$

- вероятностью необнаруживаемой ошибки при приеме информационного блока

$$P_{no} = \sum_{i=\mu+1}^n C_n^i p_0^i (1 - p_0)^{n-i}. \quad (3)$$

Для вероятностей P_{nm} , P_{no} и P_{cm} выполняется условие: $P_{nm} + P_{no} + P_{cm} = 1$.

Исходными величинами для расчета вероятностей P_{nm} , P_{no} и P_{cm} являются вероятность ошибочного приема информационного символа p_0 и параметры используемого корректирующего кода n и μ . В свою очередь, вероятности P_{bo} , P_{no} и P_{cm} и параметры схемы фрагментации W и V являются исходными для расчета вероятности правильной доставки сообщения.

С учетом различных возможных результатов передачи всех информационных блоков фрагментированное сообщение может быть принято (доставлено) правильно или неправильно, а также может быть не принято вообще (пропущено). Надежность и достоверность передачи сообщений в целом характеризуются следующими вероятностями:

- вероятностью доставки сообщения,
- вероятностью пропуска сообщения,
- вероятностью приема ложного сообщения.

Анализируя процесс восстановления фрагментированного сообщения по принятым информационным блокам и полагая, что схема восстановления сообщения начинает выполнять алгоритм восстановления сразу, как только получит первые V нестертых блоков, в которых используемым корректирующим кодом не обнаружено ошибок, можно получить выражения для вероятностей доставки сообщения, пропуска сообщения и приема ложного сообщения.

Сообщение будет восстановлено из фрагментов и принято (доставлено) правильно, если будет правильно принято не менее V информационных блоков из W переданных. Вероятность доставки сообщения:

$$P_0 = P_{nm}^V \left(1 + \sum_{i=1}^{W-V} C_{V+i}^i P_{cm}^i \right). \quad (4)$$

Сообщение будет не принято (пропущено), если при W переданных информационных блоках число стираний окажется больше чем $W-V+1$. Вероятность пропуска сообщения:

$$P_{np} = \sum_{i=W-V+1}^W C_W^i P_{cm}^i (1 - P_{cm})^{W-i}. \quad (5)$$

Сообщение будет принято неправильно (доставлено ложное сообщение), если среди первых V нестертых блоков, в которых не было обнаружено ошибок, будет хотя бы один блок, содержащий необнаруженную ошибку. Вероятность приема ложного сообщения:

$$P_{lc} = \sum_{j=1}^V C_V^j P_{no}^j (1 - P_{cm} - P_{no})^{V-j} \left(1 + \sum_{i=1}^{W-V} C_{V+i}^i P_{cm}^i \right). \quad (6)$$

Используя в качестве исходных вероятности P_{nm} , P_{no} и P_{cm} , определяемые выражениями (1) – (3) и выражения (4) – (6) для вероятностей P_0 , P_{np} и P_{lc} , можно построить их зависимости от вероятности ошибочного приема информационного символа p_0 , параметров используемого корректирующего кода n и μ и схемы фрагментации W и V .

Поскольку в интересующей области величина P_δ должна быть близка к единице, удобно проводить анализ надежности передачи сообщений по величине $1 - P_\delta$ – вероятности недоставки сообщения. На рис. 1 и 2 приведены результаты расчетов вероятности недоставки

сообщения $1 - P_\delta$ и вероятности доставки ложного сообщения $P_{\text{лс}}$ от числа повторений W .

Полагалось, что для восстановления сообщения при пороговой схеме фрагментации необходимо правильно принять $V < W$ информационных блоков.

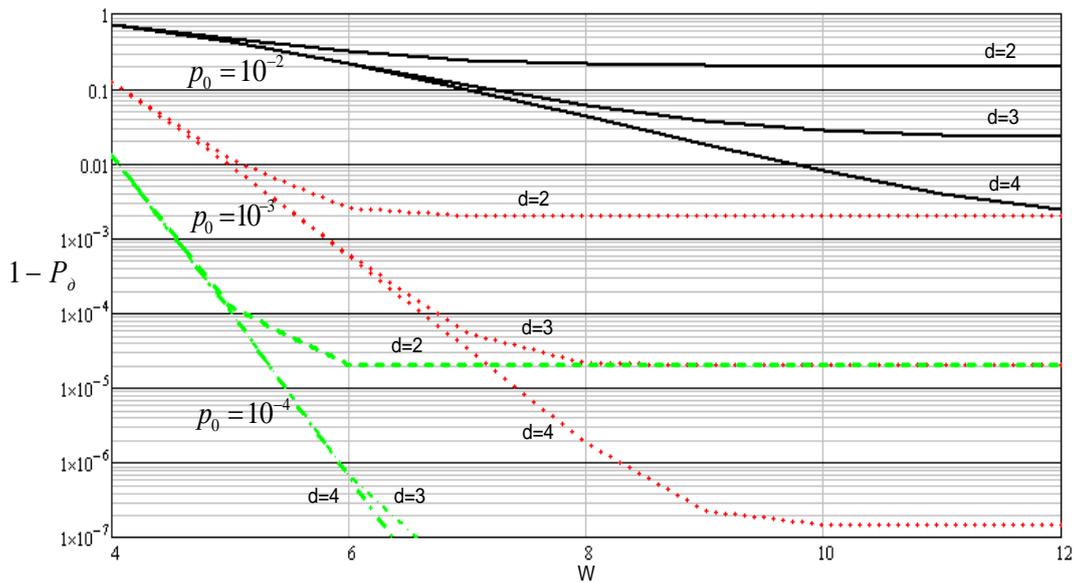


Рис. 1. Результаты расчетов вероятности недоставки сообщения от числа повторений

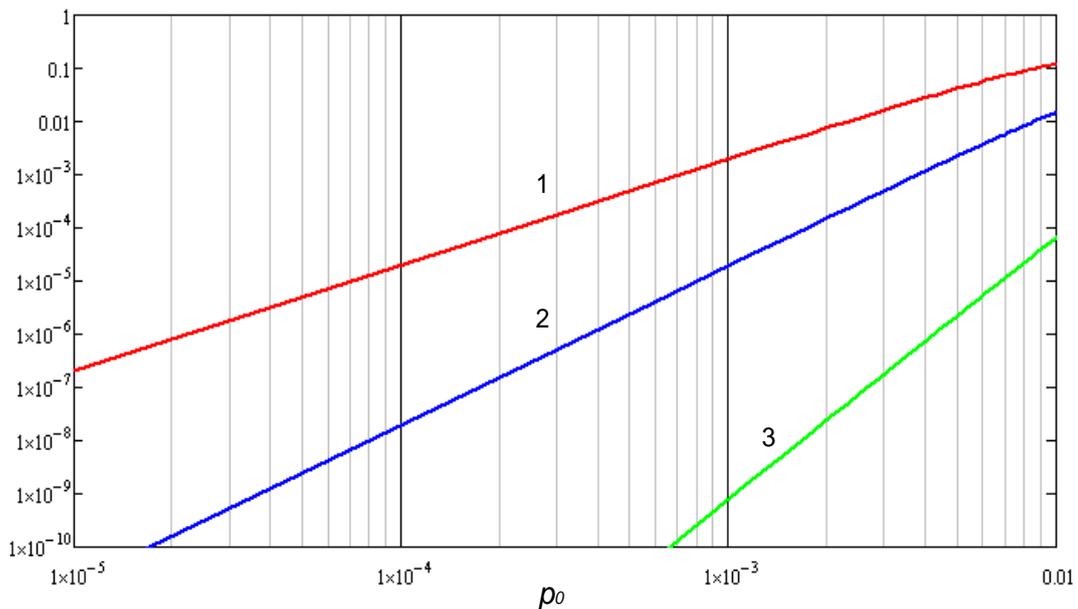


Рис. 2. Результаты расчетов вероятности доставки ложного сообщения от числа повторений

На рис. 1 представлены типичные зависимости вероятности недоставки сообщения $1 - P_\delta$ от числа передаваемых информационных блоков W для пороговой схемы фрагментации сообщений (V, W) с $V=4$ и различных значений вероятности ошибочного приема информационного символа $p_0=10^{-2}$, $p_0=10^{-3}$, $p_0=10^{-4}$ для трех кодов: код 1 с кодовым расстоянием $d=2$, обнаруживающий в каждом информационном блоке $\mu=1$ ошибку; код 2 с кодовым расстоянием $d=3$, обнаруживающий в каждом информационном блоке $\mu=2$ ошибки; код 3 с кодовым расстоянием $d=4$, обнаруживающий в каждом информационном блоке $\mu=4$ ошибки. Из графиков видно, что с увеличением W

вероятность недоставки сообщения уменьшается. Задавая требуемое значение P_δ , можно определить необходимое количество передаваемых информационных блоков. При выборе кода с большей избыточностью (кодовым расстоянием d) вероятность доставки возрастает, однако применение сложных кодов позволяет уменьшить вероятность недоставки лишь до определенного порога, зависящего от величины p_0 .

На рис. 2 представлены типичные зависимости вероятности доставки ложного сообщения $P_{\text{лс}}$ от вероятности ошибочного приема информационного символа p_0 для пороговой схемы фрагментации

сообщений (V,W) при $V=4$, $W=8$. Кривые 1 соответствуют коду 1, кривые 2 – коду 2, кривые 3 – коду 3. Из графиков видно, что данные зависимости носит монотонный характер. Поскольку вероятность ошибки p_0 в радиоканале передачи информации может изменяться в широких пределах, то при выборе параметров системы целесообразно ориентироваться на наихудшие ожидаемые условия, например, на значения вероятности ошибочного приема информационного символа $p_0=10^{-2}-10^{-3}$.

Приведенные зависимости показывают, что выбором параметров схемы фрагментации и числа передач могут быть обеспечены требуемые показатели надежности и достоверности передачи формализованных сообщений. При этом в отличие от простого увеличения избыточности помехоустойчивого кода обеспечивается уменьшение вероятностей недоставки и пропуска сообщения при том же уровне вероятности доставки ложного сообщения.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный метод фрагментированной передачи хорошо согласуется с особенностями передачи малоинформативных формализованных сообщений в служебных каналах управления БЛА, когда требуется обеспечить высокую надежность передачи в сложных условиях радиосвязи. Практическая реализация данного метода требует анализа ожидаемых условий радиосвязи с БЛА и соответствующего выбора параметров блочного корректирующего кода для передачи информационных блоков и схемы фрагментации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Моисеев В.С. Основы теории эффективного применения беспилотных летательных аппаратов: монография. Казань: Редакционно-издательский центр «Школа», 2015. 444 с.
- [2] Фокин Г.А. Обзор моделей радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 4. С. 85–101.
- [3] Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы. Справочник. М.: Горячая линия–Телеком, 2004. 126 с.
- [4] Вернер М. Основы кодирования / Пер с нем. М.: Техносфера, 2008. 288 с.
- [5] Ли У.К. Техника подвижных систем связи. М.: Радио и связь, 1985. 391 с.
- [6] Боев Н.М. Построение систем связи беспилотных летательных аппаратов для передачи информации на большие расстояния / Н.М. Боев, П.В. Шаршавин, И.В. Нигруца // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 3. С. 147–158.