

УДК 681.396

В.И. Кортунов, А.Н. Гора, А.А. Акулиничев

*Национальный аэрокосмический университет им Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*

## МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СЖАТИЯ НА ОСНОВЕ АСИМПТОТИЧЕСКОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ

*Проведен обзор методов сжатия, предложен параметрический метод для передачи полетных данных. Показан принцип работы параметрического сжатия на основе асимптотического наблюдателя состояния. Доказано, что применение такого сжатия происходит без потерь. Результаты моделирования метода в среде MatLab на примере полетных данных БЛА доказали применимость метода сжатия для ГСППД. Использование параметрического сжатия на основе асимптотического наблюдателя состояния, а его модификация позволяет увеличивать продуктивность и уменьшать затраты на передачу данных в ГСППД.*

**Ключевые слова:** параметрические методы сжатия, наблюдатель состояния, глобальная система передачи полетных данных

### Введение

Современные системы передачи полетных данных содержат компрессоры данных, реализовывающие соответствующие методы сжатия. Без компрессии данных работа таких систем невозможна. Так организована работа, например, глобальной системы передачи полетных данных (ГСППД) [1], которая состоит из множества подсистем сбора, обработки информации, радарных и голосовых систем, метеорологических и диспетчерских служб и предназначена для обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов (ЛА) гражданской авиации путем оперативного получения информации с борта наземными службами и своевременного принятия решения в критических режимах. Система должна работать без привязки к специализированным техническим средствам навигации и при нахождении ЛА в любой точке земли и состоит из наземной и бортовой части. Наземная часть располагается на диспетчерских пунктах и обеспечивает обработку и хранение полетной информации. Бортовая часть подключается к

бортовой шине системы контроля ЛА и позволяет без участия экипажа передавать значения параметров работы систем ЛА и параметров полета наземным службам в реальном масштабе времени. Структурная схема ГСППД представлена на рис.1.

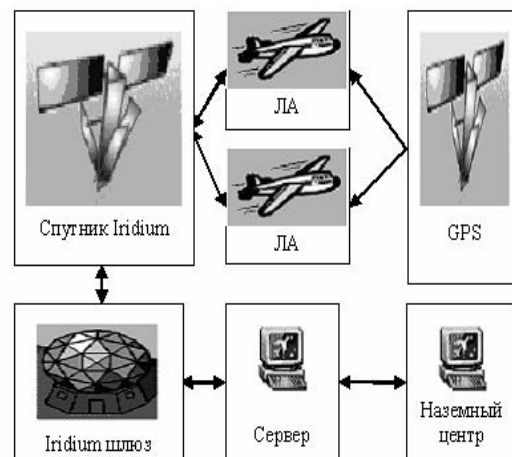


Рис. 1. Структурная схема системы передачи полетных данных

Для повышения летной безопасности глобальная система передачи полетных данных должна выполнять следующие функции [2, 3]:

1. Дополнительный контроль параметров борта ЛА в реальном масштабе времени.
2. Обмен текстовыми сообщениями и данными между пользователями системы.
3. Обеспечение резервной голосовой связи с наземными службами.
4. Предоставление полетной информации пользователям системы.

Передача данных с борта ЛА на наземный центр происходит с использованием систем спутниковой связи, например Inmarsat, которые имеют ограниченный канал по пропускной способности [2 – 5]. Для эффективного выполнения перечисленных функций необходимо обеспечить согласование пропускной способности канала спутниковой связи для передачи полетных данных. Кроме того увеличение объема передаваемых данных возрастает при критических режимах полета ЛА – взлет/посадка, а также в аварийных и аварийных ситуациях. Такое согласование при передаче полетной информации можно обеспечить путем сжатия данных [6 – 18]. В общем случае, сжатие данных имеет многокритериальное значение - с целью экономии материальных ресурсов, затрачиваемых на оплату услуг связи спутниковой системы, обеспечение передачи требуемого объема информации с ограниченным каналом связи, увеличения передаваемых параметров в критических режимах или количества наблюдаемых ЛА.

В статье рассмотрены эффективные методы сжатия полетной информации, применимые для ГСППД. Предложен параметрический метод на основе наблюдателя состояния и представлен результат моделирования на примере данных телеметрического канала беспилотного летательного аппарата.

## 1. Обзор параметрических методов сжатия данных

На сегодняшний день существует множество различных методов экономного кодирования или сжатия информации [7 – 10]. Экономное кодирование делится на кодирование формы сигнала и кодирование источника сигнала [7 – 14]. Наиболее известный и простой метод сжатия информации - это кодирование серий последовательностей (Run Length Encoding - RLE) [7], который применим в нашем случае для разовых команд. Суть методов данного подхода состоит в замене цепочек или серий повторяющихся байтов или их последовательностей на один

кодирующий байт и счетчик числа их повторений. Недостатком метода RLE является достаточно низкая степень сжатия, порядка 7 ... 10 раз [8].

Процесс сжатия данных без применения метода RLE можно разбить на два этапа - моделирование и кодирование. Эти процессы и их реализующие алгоритмы достаточно независимы и разноплановы [8]. В виду многообразия таких методов рассмотрим основные.

Статическое кодирование Хаффмана [11], заключается в просмотре данных и построении кодирования на основании собранной статистики, при этом требуется два прохода - один для просмотра и сбора статистической информации, второй – для кодирования. Данный метод не применим к полетным данным так, как исключается возможность однопроходного кодирования "на лету", что не дает возможности работать в реальном масштабе времени.

Принцип метода адаптивного кодирования состоит в том, чтобы менять схему кодирования в зависимости от характера изменений данных. Такой метод имеет однопроходный алгоритм. Адаптивное кодирование может дать большую степень сжатия, по сравнению со статическим и известно как динамическое кодирование Хаффмана [12]. Такой метод применим как для разовых команд, так и для передачи непрерывных параметров, но в виду невысокой степени сжатия [12], является не приемлемым для ГСППД.

Еще одним способом кодирования формы сигнала является метод импульсно - кодовой модуляции (ИКМ) [8], при котором происходит дискретизация и равномерное квантование входного сигнала, а также преобразование полученного результата в равномерный двоичный код. Следующим этапом развития кодирования формы сигнала является дифференциальная импульсно-кодовая модуляция (ДИКМ). Основная идея лежит в том, что предсказание текущего отсчета сигнала происходит по нескольким предыдущим его значениям, и далее, кодирование не самого отсчета, а ошибки предсказания – разности между истинным значением текущего отсчета и его предсказанным значением. Чем более предсказуемым будет поведение кодируемого сигнала, тем более эффективным будет его сжатие. Простейшим способом предсказания является использование предыдущего отсчета сигнала для предсказания его текущего значения.

На рис. 2 приведена схема кодирования методом ДИКМ. Известно, что такой способ широко используется при сжатии речевых сигналов [11].

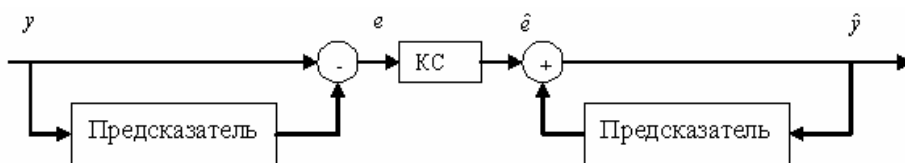


Рис. 2. Схема кодирования методом ДИКМ

К сожалению, точность предсказания не всегда растет с ростом порядка предсказателя, поэтому обычно ограничиваются предсказателями не выше 2 – 3-го порядка. ДИКМ не может использоваться для данных имеющих дискретное представление, как например разовые команды полетных данных, но при модификации метод становится применим для сжатия непрерывных параметров ЛА.

Следующим классом методов кодирования являются методы кодирования источника сигнала [15]. В отличие от метода кодирования формы сигнала, вообще не использующего информацию о том, как был сформирован кодируемый сигнал, методы сжатия источника основываются именно на модели источника и из кодируемого сигнала извлекают информацию о параметрах этой модели. При этом результат кодирования являются не коды сигнала, а коды параметров источника этих сигналов [15 – 18].

Широко распространенным методом кодирования источника сигнала является метод кодирования коэффициентами линейного предсказания [6-7]. Принцип работы метода рассмотрим на примере кодирования речевой информации. Кодирование речи коэффициентами линейного предсказания опирается на теорию статистического анализа временных рядов. Суть метода заключается в следующем. Пусть имеется последовательность отсчетов (выборки) речевого сигнала, для этой выборки вычисляется «взвешенное среднее» значение. Для интервала 1020 мс считают неизменными статистические свойства речевого сигнала, этот интервал кодируют набором коэффициентов, которые минимизируют средне-квадратическую ошибку предсказания, т.е. сводят к

минимуму ошибку предсказания между исходным и сглаженным рядом. В этом случае вычисление коэффициентов представляет весьма трудоемкий процесс (решаются уравнения методом наименьших квадратов). Практически интервал квантования составляет 50,1 мс, а число отсчетов 100200, что приводит к числу коэффициентов модели в пределах 4-14. В итоге представление речи, составленное из отсчетов, следующих с частотой 1020 кГц, преобразуется в последовательность векторов параметров, следующих с частотой 50,1 кГц. Это дает сжатие в 50-100 раз при хорошем качестве речи [14-17]. Применение такого метода к полетным данным в чистом виде неприемлемо, так как построение полной динамической модели ЛА является сложным и трудоемким процессом, кроме того, объем параметров такой модели станет соизмерим с объемом полетных данных.

Однако, все существующие методы в «чистом» виде не дают необходимых коэффициентов сжатия или быстродействия. В связи с этим предлагается гибридный метод – параметрическое сжатие на основе предсказателя в форме наблюдателя состояния.

## 2. Параметрический метод сжатия на основе асимптотического наблюдателя состояния

Параметрическая модель (предсказатель) предсказывает текущее значение отсчета сигнала по предыдущим значениям, тогда возможно кодирование не самого отсчета, а ошибки предсказания – разности между текущим значением отсчета и предсказанным. Структурная схема кодирования/декодирования может быть представлена на рис. 3.

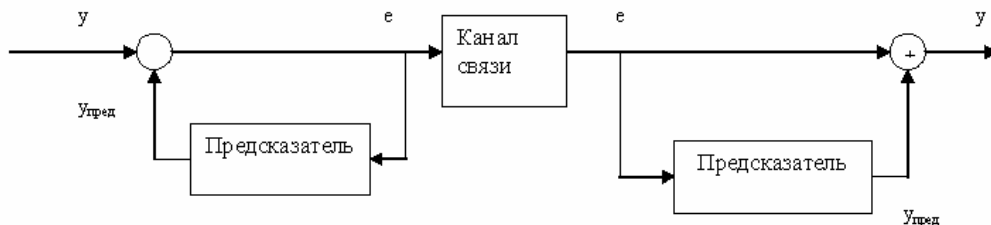


Рис. 3. Схемы кодирования и декодирования на основе асимптотического наблюдателя состояния

В качестве предсказателя предлагается использование асимптотического наблюдателя состояния (НС) [17, 18].

Имея модель сигнала (параметра ЛА) можно вычислить оценку значения сигнала. Пусть динамическая модель сигнала описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bv_k; \\ y_k &= Cx_k, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $v_k$  – порождающий шум;  $y_k$  – выходной сигнал;  $A, B, C$  – матрицы состояния, входа и измерения;  $x_k$  – вектор состояния.

Предположим, что матрицы  $A, B, C$  известны, тогда  $y_k$  можно оценить с помощью уравнений:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1} &= A\hat{x}_k; \\ \hat{y}_k &= C\hat{x}_k, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\hat{y}_k$  – оценка  $y_k$ .

Такой вид предсказателя обладает недостатком – необходимостью иметь совпадение начальных условий процесса (1) и модели (2).

Для преодоления этого недостатка предлагается использование асимптотического НС. Преимущества НС в данном случае следующие:

1. Если вводим в уравнение модели ошибку наблюдения  $\hat{x}_{k+1} = A\hat{x}_k + v_k + L(y_k - C\hat{x}_k)$ , где  $L$  – некоторая матрица, обеспечивающая скорость сходимости оценки, то динамика сходимости увеличивается, вследствие чего уменьшается ошибка  $e_k$ .

Выбором  $L$  можно изменять полюса НС, что приводит уменьшению ошибки.

2. Использование НС для выделения ошибки наблюдения, как основного сигнала, обеспечивает инвариантность к начальным условиям. Таким образом, в случае потери или передачи неверных начальных условий система останется работоспособной.

Рассмотрим прохождение сигнала через предложенную схему кодирования/декодирования на основе асимптотического НС.

Для этого вычислим ошибку наблюдения, которая будет передаваться в канал связи:

$$\begin{aligned} e_k &= y_k - Cx_k; \\ x_{k+1} &= Ax_k + Le_k; \\ y_k &= Cx_k \end{aligned} \quad (3)$$

На приемной стороне канала связи происходит восстановление сигнала из ошибки и этот процесс можно описать уравнениями:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Le_k; \\ \hat{y}_k &= Cx_k + e_k. \end{aligned} \quad (4)$$

В соответствии с уравнениями 3,4 систему кодирования (рис. 3) можно представить в виде, изображенном на рис. 4.

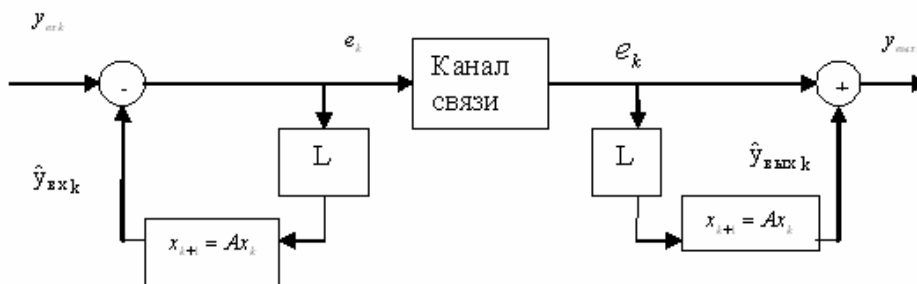


Рис. 4. Структурная схема кодирования/декодирования полетных данных

Покажем, что в такой схеме происходит передача сигнала без потерь. Для этого запишем в  $z$ -преобразованном виде сигналы:

$$E(z) = Y_{\text{вх}}(z) - CX(z);$$

$$X(z) = (Iz - A)^{-1}E(z);$$

$$E(z) = Y_{\text{вх}}(z) - C(Iz - A)^{-1}LE(z);$$

$$E(z)[1 + C(Iz - A)^{-1}L] = Y_{\text{вх}}(z);$$

$$Y_{\text{вых}}(z) = E(z) + (C(Iz - A)^{-1}L)E(z);$$

$$Y_{\text{вых}}(z) = E(z)[1 + C(Iz - A)^{-1}L].$$

Передаточная функция преобразователя передающей стороны может быть записана в виде

$$W_{\text{перед}}(z) = \frac{E(z)}{Y_{\text{вх}}(z)} = [1 + C(Iz - A)^{-1}L]^{-1},$$

а передаточная функция преобразователя приемной стороны соответственно

$$W_{\text{пр}}(z) = \frac{Y_{\text{вых}}(z)}{E(z)} = 1 + C(Iz - A)^{-1}L.$$

Если предположить отсутствие помех в канале связи, то получим

$$\begin{aligned} Y_{\text{вых}} &= W_{\text{пр}}(z) * W_{\text{пех}}(z) * Y_{\text{вх}}(z) = \\ &= [1 + C(Iz - A)^{-1}L]^{-1} * (1 + C(Iz - A)^{-1}L) * Y_{\text{вх}}(z), \end{aligned}$$

следовательно  $Y_{\text{вх}} = Y_{\text{вых}}$ , и схема сжатия работает без потерь.

Рассмотрим модификацию параметрического метода сжатия, которая позволяет дополнительно увеличить коэффициент сжатия. Принцип действия модифицированной системы заключается в следующем: ошибка передается не постоянно, а с некоторым периодом. На приемной стороне восстанов-

ление сигнала происходит по «замороженной» ошибки, то есть в моменты времени, когда передача ошибки отсутствует, для восстановления сигнала ошибка принимается равной предыдущему значению. Такая модификация позволяет увеличить степень сжатия, причем коэффициент сжатия зависит от качества предсказателя, однако, вместе с этим передача данных становится с потерями. Основная сложность в реализации таких систем – это построение адекватных модели и выбор коэффициентов обратной связи.

### 3. Оценка сжатия полетных данных параметрическим методом на основе наблюдателя состояния

В анализе оценки эффективности метода сжатия основными критерием качества считаем коэффициент сжатия. Исходными данными для анализа является телеметрического канала беспилотного летательного аппарата [19]. В анализе получены автокорреляционные функции непрерывных параметров, на основании которых, рассчитаны коэффициенты линейных предсказателей. Например, для параметров курса была получена модель и асимптотический НС. Совпадения исходного и предсказанного сигналов показано на рис. 5, а исходного и восстановленного – на рис. 6. Участки расхождения объясняются процедурой округления предсказанного сигнала.

При этом порядок ошибки предсказания не превышает допустимых значений.

Для полетных данных БЛА при моделировании метода кодирования в среде MatLab получены коэффициенты сжатия, представленные в табл. 1.

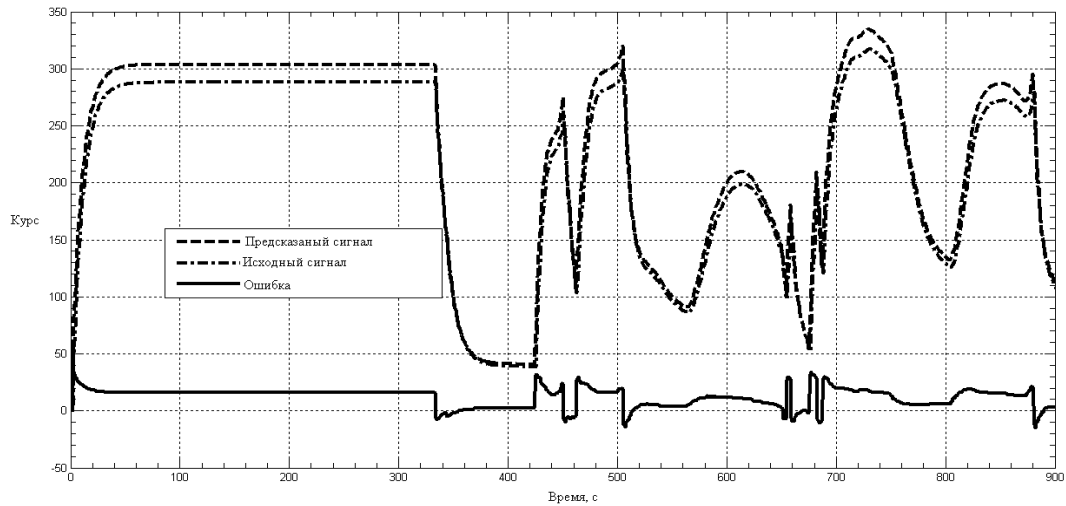


Рис. 5. График исходного сигнала (курса), предсказанного сигнала и передаваемой ошибки

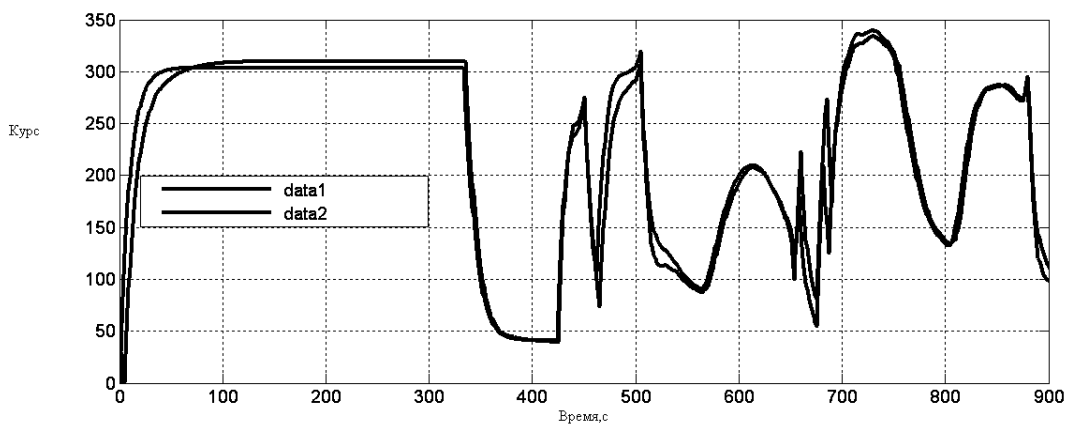


Рис. 6. График исходного и восстановленного сигналов

Таблица 1  
Оценка коэффициентов сжатия кодера

Параметр	Коэффициент сжатия
	Порядок предсказателя =3
Ускорение по оси X	49
Ускорение по оси Y	50
Ускорение по оси Z	47
Скорость вертикальная	49
Скорость восточная	52
Курс	50
Тангаж	48
Крен	52
Воздушная скорость	47
Коор X	44
Коор Y	44
Коор Z	44
Скорость	47

ШИМ руля высоты	55
ШИМ руля направления	47
Элероны	47
Двигатель	44
Угловая скорость X	37
Угловая скорость Y	36
Угловая скорость Z	37
Скорость северная GPS	43
Скорость GPS	42
Скорость восточная GPS	42
Баровысота	38

Результаты моделирования позволили оценить средний коэффициент сжатия полетных данных, который получен равным 43, что достаточно для нормального функционирования ГСППД. Кроме того, существует возможность увеличения степени сжатия при применении модифицированного метода с замораживанием ошибки.

## Заключение

На основании проведенного обзора методов сжатия предложен параметрический метод для передачи полетных данных. Показан принцип работы параметрического сжатия на основе асимптотического наблюдателя состояния. Доказано, что применение такого сжатия происходит без потерь. Результаты моделирования метода в среде MatLab на примере полетных данных БЛА доказали применимость метода сжатия для ГСППД. Использование параметрического сжатия на основе асимптотического наблюдателя состояния а его модификация позволяет увеличивать продуктивность и уменьшать затраты на передачу данных в ГСППД.

## Список литературы

1. Дьяченко А.А. Летательные аппараты и безопасность полета / А.А. Дьяченко. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1987. – 625 с.
2. Авиационные приборы и навигационное оборудование / О.А. Бабич, В.А. Боднер, М.С. Козлов и др. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского 1986. – 639 с.
3. Михайлов Б. Модернизация и пути повышения эффективности системы организации воздушного движения [Электронный ресурс] / Б. Михайлов. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.avia.ru/inter/96/>.
4. Коровин М.А. Авиационные средства связи: учебное пособие / М.А. Коровин. – Ворошиловград: ВВАУШ, 1990. – 94 с.
5. Бондарев В.Н. Цифровая обработка сигналов: методы и средства / В.Н. Бондарев, Г.Н. Трестер, В.С. Чернега. – Севастополь: СевГТУ, 1999. – 398 с.
6. Еремеев И.С. Устройства сжатия информации / И.С. Еремеев. – М.: Энергия, 1989. – 160 с.
7. Зив Дж. Неравенства и алгоритмы универсального сжатия данных / Дж. Зив // Проблемы передачи информации. – 1996. – Т. 32, вып. 1. – С. 35-40.
8. Методы сжатия. Устройства архиваторов, сжатия изображений и видео / Д. Ватолин, А. Ратушник, М. Смирнов, В. Юкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 382 с.

9. Орищенко В.И. Сжатие данных в системах сбора и передачи информации / В.И. Орищенко, В.Г. Санников, В.А. Свириденко. – М.: Радио и связь, 1985. – 184 с.

10. Рябо Б.Я. Быстрый алгоритм адаптивного кодирования / Б.Я. Рябо // Проблемы передачи информации. – 1990. – Т. 32, вып. 2. – С. 22-29.

11. Теория информации. Кодирование дискретных вероятностных источников: учебное пособие / В.Н. Потанов; Министерство образования Российской Федерации, Новосибирский государственный университет – Новосибирск. 1999. – 71 с.

12. Сэломон Д. Сжатие данных, изображения и звука: пер. с англ. / Д. Сэломон. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2004. – 361 с.

13. Шульгин В.И. Основы теории передачи информации Ч I. / В.И. Шульгин. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2003. – 102 с.

14. Вокoderная телефония. Методы и проблемы / Под ред. А.А. Пирогова – М.: Связь, 1974. – 246 с.

15. Зюко А.Г. Методы низкоскоростного кодирования при цифровой передаче речи / А.Г. Зюко, В.Л. Банкет, В.Ю. Лехан // Зарубежная радиоэлектроника. – 1986. – № 11. – С. 53-70.

16. Коротаев Г.А. Некоторые аспекты линейного предсказания при анализе речевого сигнала / Г.А. Коротаев // Зарубежная радиоэлектроника. – 1991. – № 7. – С. 13-31.

17. Прокис Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис; под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.

18. Шелухин О.И. Цифровая обработка и передача речи / О.И. Шелухин, Н.Ф. Лукьянцев. – М.: Радио и связь, 2000. – 328 с.

19. Кортунув В.И. Миниавтопилот на основе интегрированной БИНС с микромеханическими датчиками [Электронный ресурс] / В.И. Кортунув. – Режим доступа к ресурсу: <http://k504.xai.edu.ua/nauka.php?link=Autopilot/autocontrol>.

Поступила в редколлегию 30.04.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.В. Лукин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## МЕТОДИ ПАРАМЕТРИЧНОГО СТИСКУ НА ОСНОВІ АСИМПТОТИЧНОГО СПОСТЕРІГАЧІВ СТАНУ

В.І. Кортунув, О.М. Гора, А.А. Акулінічев

Проведено огляд методів стиснення, запропонований параметричний метод для передачі польотних даних. Показаний принцип роботи параметричного стиснення на основі асимптотичного спостерігача стану. Доведено, що застосування такого стиснення відбувається без втрат. Результати моделювання методу в середовищі MatLab на прикладі польотних даних БЛА довели застосовність методу стиснення для ГСППД. Використання параметричного стиснення на основі асимптотичного спостерігача стану а його модифікація дозволяє збільшувати продуктивність і зменшувати витрати на передачу даних у ГСППД.

**Ключові слова:** параметричні методи стиску, спостерігач стану, глобальна система передачі польотних даних.

## THE METHOD OF PARAMETRIC COMPRESSION BASED ON ASYMPTOTIC OBSERVER STATUS

V.I. Kortunov, A.N. Gora, A.A. Akulynichev

A review of compression methods, proposed parametric method for the transfer of flight data. Illustrates the principle of parametric compression based on the asymptotic observer status. It is proved that the use of such compression is lossless. The results of simulation methods in MatLab for example UAV flight data showed the applicability of the method of compression for GSPPD. Using a parametric compression based on asymptotic observer status and its modification can increase productivity and reduce costs for data transmission in GSPPD.

**Keywords:** parametric methods of compression, the observer states, the global system of transmission of flight data.