

## Повышение эффективности многоканальных систем связи за счёт координирования канальных сигналов

Г.С. Воронков<sup>1</sup>, П.Е. Филатов<sup>1</sup>, А.Х. Султанов<sup>1</sup>, Р.В. Кутлуяров<sup>1</sup>,  
И.Л. Виноградова<sup>1</sup>, И.В. Кузнецов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Карла Маркса 12, Уфа, Россия, 450008

**Аннотация.** Предложен метод повышения энергетической эффективности и помехоустойчивости многоканальных систем связи, основанный на обобщенной координации канальных сигналов. Для этой цели предложено использовать координирующую матрицу, элементы которой представляют собой значения линейных коэффициентов корреляции сигналов различных каналов. Показана возможность снижения динамического диапазона канальных сигналов при сохранении качества связи. Показана возможность синтеза инвариантных (с неограниченным увеличением коэффициента передачи в отдельных каналах) координированных групповых ДИКМ-кодеков для систем с однотипными каналами.

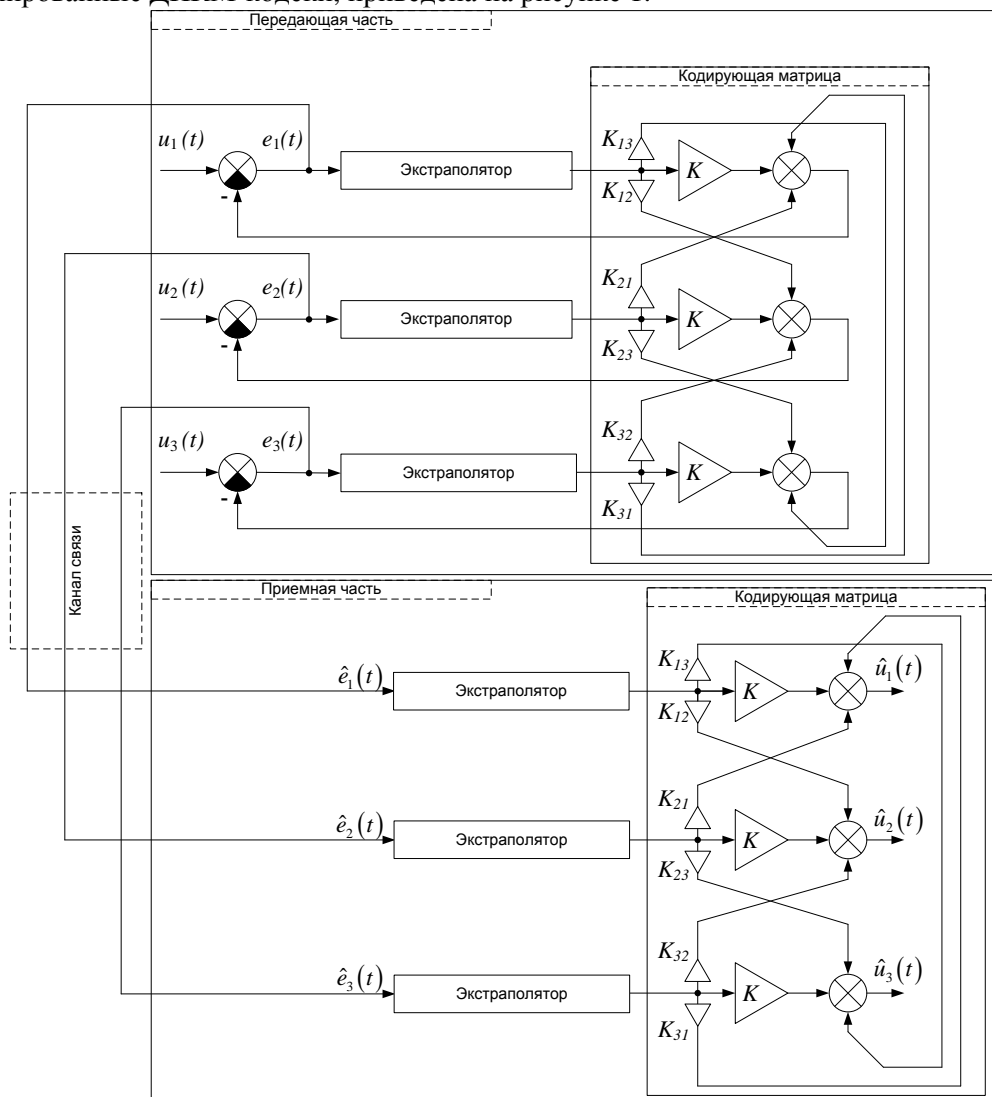
### 1. Введение

Развитие технологий беспроводной связи неотъемлемо связано с ростом скорости передачи данных в каналах связи. Это, в свою очередь, требует соответствующего увеличения отношения «сигнал-шум» на приеме, что негативно сказывается на энергопотреблении передатчиков. Для снижения темпов роста энергопотребления необходимо внедрение в технике связи технологий, повышающих её энергетическую эффективность. При этом мерой энергетической эффективности предлагается считать отношение скорости передачи к потребляемой передатчиком мощности, необходимой для обеспечения указанной скорости [1]. Одним из способов решения указанной задачи является использование координированных групповых кодеков дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (ДИКМ) [2]. Основная идея их применения заключается в использовании общего координированного экстраполятора по всем каналам многоканальной системы. В работах [1-4] рассматривался синтез координированных групповых ДИКМ-преобразователей, основанный на решении оптимизационных задач. Несмотря на достигаемые результаты (снижение динамического диапазона сигналов), групповые ДИКМ-преобразователи такого вида имеют недостатки. В первую очередь необходимо обратить внимание на сложность аналитического конструирования экстраполяторов, требующего проведения операций факторизации и сепарации. В указанных работах решения получены для малого (не превышающего 4) количества каналов. Его увеличение приводит к резкому возрастанию вычислительной сложности.

В качестве альтернативы описанным методам предлагается для систем с однотипными каналами рассмотреть метод синтеза ДИКМ-преобразователей с кодирующей матрицей, основанный на оценке его устойчивости (без решения оптимизационной задачи).

**2. Структура координированного многоканального ДИКМ-кодека и постановка задачи**

Структурная схема многоканальной системы с количеством каналов  $n$ , использующей координированные ДИКМ-кодеки, приведена на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Структура прямо-передающего тракта группового ДИКМ-кодека с кодирующей матрицей.

На вход передающей части системы поступают входные воздействия  $u_i(t)$ , где  $i=1..n$ , формируя тем самым вектор водного воздействия  $\bar{U} = [u_1, \dots, u_n]^T$  ( $T$  – операция транспонирования). На вторые входы элементов сравнения подаются экстраполированные сигналы  $\tilde{u}_i(t)$ . Разностные сигналы  $e_i(t)$ , представляющие собой ошибки экстраполяции, образуют в совокупности вектор  $\bar{E} = [e_1, \dots, e_n]^T$ , элементы которого определяются как

$$e_i(t) = u_i(t) - \tilde{u}_i(t), \tag{1}$$

передаются в канал связи. Также передающая часть включает в себя экстраполяторы и кодирующую матрицу. Экстраполятор представляет динамическую часть системы, состоящую

из блоков аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования, фильтров и прочих элементов, описываемую в дальнейшем передаточной функцией  $W_3(s)$ :

$$W_3(s) = m_i \cdot W(s), \tag{2}$$

где  $m_i$  – известный статический коэффициент передачи канала с номером  $i$ , определяемый исходя из уровня шума в этом канале;  $W(s)$  – эквивалентная передаточная функция динамической части экстраполятора, принадлежащая классу физически реализуемых, минимально-фазовых систем;  $s$  – комплексная переменная Лапласа. При этом под «однотипностью» канальных подсистем понимается одинаковость их передаточных функций  $W(s)$ .

Отличительной особенностью кодера, представленного на рисунке 1 от известных, является использование кодирующей симметричной матрицы  $K$  размерности  $n \times n$ . Она предназначена либо для обеспечения помехоустойчивости системы, либо для повышения информационной безопасности системы. С точки зрения помехоустойчивости, матрица  $K$  может быть описана следующим образом:

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{12} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{1n} & k_{2n} & \dots & k_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n}, \tag{3}$$

где элементы  $k_{ii}$  (в дальнейшем будем полагать  $k_{ii} > 0$ ), расположенные на главной диагонали, являются неизвестными и подлежат определению. Элементы, находящиеся вне главной диагонали,  $k_{ij}$  представляют собой значения линейных коэффициентов корреляции элементов каналов  $i$  и  $j$  ( $i \neq j$ ), определяемые по формуле

$$k_{ij} = \frac{1}{\sigma_i \sigma_j} \cdot \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (u_{it} - \bar{u}_i)(u_{jt} - \bar{u}_j), \tag{4}$$

В выражении (4)  $u_{it}, u_{jt}$  – отсчеты соответственно  $i$ -го и  $j$ -го каналов,  $\bar{u}_i, \bar{u}_j$  – их средние значения,  $\sigma_i, \sigma_j$  – среднеквадратическое отклонение отсчетов соответствующих сигналов,  $N$  – количество отсчетов. Следовательно, назначение матрицы  $K$  заключается в обеспечении информационного координирования между каналами системы.

На вход приёмной части системы поступают оценки разностных сигналов  $\hat{e}_i(t)$ . Их прохождение через экстраполяторы и кодирующую матрицу (идентичные таковым в передающей части) позволяет получить оценку исходных сигналов  $\hat{u}_i(t)$  по формуле:

$$\hat{u}_i(t) = \tilde{u}_i(t) + \hat{e}_i(t), \tag{5}$$

где  $\tilde{u}_i(t)$  – экстраполированное значение оценки исходного сигнала.

При этом из формулы (1) видно, что для получения выигрыша в энергосбережении необходимо, чтобы разностные канальные сигналы не превышали по амплитуде соответствующие исходные сигналы (что также указывает на уменьшение динамического диапазона сигналов, передаваемых в канал связи:

$$|e_i(t)| < |u_i(t)|.$$

Таким образом, задачу синтеза координированных групповых ДИКМ-кодеков с однотипными каналами математически можно сформулировать следующим образом. При известной структуре приемной части, известных передаточных функций экстраполяторов  $W(s)$ , принадлежащих к заданному классу физически реализуемых, минимально фазовых систем и структуре кодирующей матрицы  $K$ , определить коэффициенты  $k_{ii}$  исходя из условия асимптотической устойчивости системы, т.е.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_i(t) = 0, \quad i = \overline{1, n}.$$

### 3. Решение

Решение задачи получено на основании частотного критерия устойчивости Ильясова-Кабальнова [5, 6]. В соответствии со структурной схемой получим уравнение, связывающее векторы  $\bar{E}, \bar{U}$ ,

$$[I + K * \text{diag}[m_i W(s)]] \bar{E} = \bar{U}, \tag{6}$$

(в (6)  $I$  – единичная матрица размерности  $n \times n$ ). Откуда характеристический полином системы равен

$$d(s) = \det \begin{bmatrix} 1 + k_{11} m_1 W(s) & k_{12} m_2 W(s) & \bullet & k_{1n} m_n W(s) \\ k_{12} m_1 W(s) & 1 + k_{22} m_2 W(s) & \bullet & k_{2n} m_n W(s) \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ k_{1n} m_1 W(s) & k_{2n} m_2 W(s) & \bullet & 1 + k_{nn} m_n W(s) \end{bmatrix}_{n \times n}. \tag{7}$$

Далее в целях упрощения последующего решения, введем дополнительное условие

$$k_{11} m_1 = k_{22} m_2 = \dots = k_{nn} m_n = k,$$

т.е. решать задачу будем относительно одной переменной  $k$ . Также в целях удобства последующих выкладок для всех известных коэффициентов  $k_{ij}$  ( $i \neq j$ ),  $m_j$ , положим  $k_{ij} m_j = k_{ij}^*$ ,  $i \neq j$ . Тогда определитель (7) и, соответственно, характеристическое уравнение передающей части системы на рис. 1, может быть представлено в виде полинома  $d(h, \Phi)$  по передаточной функции  $\Phi(s)$  однотипной подсистемы

$$d(h, \Phi, k) = 1 + \frac{h_2}{k^2} \Phi^2(s) + \frac{h_3}{k^3} \Phi^3(s) + \dots + \frac{h_n}{k^n} \Phi^n(s) = 0, \tag{8}$$

где  $h_m$  – характеристики связи между  $m$  сепаратными каналами-экстраполяторами через координирующую матрицу находятся по формулам

$$h_m = \sum_{i,j,\dots,l=1}^{c_m} \frac{h_{i,j,\dots,l}}{m}, \quad \frac{h_{i,j,\dots,l}}{m} = \frac{\det \|k_{ij}^* \gamma_{ij}\|_{m \times m}}{\det \|k_{ij}^* \delta_{ij}\|_{m \times m}},$$

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j, \\ 1, & i \neq j, \end{cases} \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad m = \overline{2, m},$$

$$\Phi(s) = \frac{kW(s)}{1 + kW(s)}. \tag{9}$$

Характеристическое уравнение (8) соответствует замкнутым системам управления с однотипными подсистемами. Поэтому для исследования устойчивости системы (8) применим частотный критерий устойчивости Ильясова-Кабальнова [5, 6]. В соответствии с этим критерием произведем в (8) подстановку  $\Phi(s) = \eta$  и рассмотрим уравнение

$$1 + \frac{h_2}{k^2} \eta^2 + \frac{h_3}{k^3} \eta^3 + \dots + \frac{h_n}{k^n} \eta^n = 0. \tag{10}$$

Согласно критерию Ильясова-Кабальнова, для устойчивости однотипной системы (6) нужно выбрать  $k$  таким, чтобы годограф амплитудно-фазовой характеристики (АФХ)  $\Phi(j\omega)$ ,  $\omega \in (-\infty; +\infty)$ , (устойчивой однотипной подсистемы) не охватывал не один из корней уравнения (10).

На основании данного критерия можно предложить один из возможных методов синтеза координированных ДИКМ преобразователей, требующих незначительный вычислительный ресурс. Область значений  $k$  при этом определяется исходя из требования асимптотической устойчивости рассматриваемой системы. Проведенное исследование показывает возможность существования параметрически инвариантной системы групповых ДИКМ-кодексов с однотипными каналами, которая является устойчивой при  $k \rightarrow +\infty$  (при условии устойчивости

$\Phi(s)$ ). Ограничение величины  $k$  можно осуществлять из дополнительных соображений (например, исходя из быстродействия, точности, помехоустойчивости системы и т.п.). Анализ устойчивости системы координированных кодеков произведен на основании [7]. Показано, что при  $h_i \neq 0 (i = \overline{2, n})$  система будет оставаться устойчивой при неограниченном увеличении коэффициента  $k$  прямой связи. Таким образом, показана возможность синтеза инвариантных (с неограниченным увеличением коэффициента передачи в сепаратных каналах) координированных групповых ДИКМ-кодексов с однотипными каналами путем их сведения к системам «мееровского» типа. Одновременно наличие кодирующей матрицы открывает возможность кратковременного отключения одного или нескольких входных каналов без потери передаваемой в них информации – за счёт восстановления её на приёме из сигналов других каналов.

#### 4. Литература

- [1] Воронков, Г.С. Повышение энергоэффективности систем радиосвязи с ортогональным частотным мультиплексированием сигналов на основе их экстраполяции по Калману / Г.С. Воронков, И.В. Кузнецов, А.Х. Султанов // Инфокоммуникационные технологии. – 2017. – Т. 15, № 3. – С. 273-280.
- [2] Кузнецов, И.В. Разработка группового кодека с дифференциальной импульсно-кодовой модуляцией сигналов для многоканальных энергодефицитных систем передачи данных / И.В. Кузнецов, П.Е. Филатов, А.Н. Гимаев // Радиотехника. – 2015. – № 2. – С. 87-92.
- [3] Кузнецов, И.В. Разработка группового кодека с дифференциальной импульсно-кодовой модуляцией сигналов на основе разностной схемы остатков предсказания / И.В. Кузнецов, А.Х. Султанов, П.Е. Филатов, Е.А. Смирнова // Радиотехника. – 2017. – № 2. – С. 23-30.
- [4] Кузнецов, И.В. Аспекты построения группового кодека с дифференциальной импульсно-кодовой модуляцией сигналов для многоканальных систем связи / И.В. Кузнецов, П.Е. Филатов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – Т. 10, № 2. – С. 34-39.
- [5] Ильясов, Б.Г. Исследование устойчивости однотипных многосвязных систем автоматического управления с голономными связями между подсистемами / Б.Г. Ильясов, Ю.С. Кабальнов // Автомат. и телемех. – 1995. – № 8. – С. 82-90.
- [6] Кузнецов, И.В. Координированное управление динамическими объектами в сложных технических системах / И.В. Кузнецов, А.Х. Султанов. – Уфа: УГАТУ, 2012. – 207 с.
- [7] Мееров, М.В. Оптимизация систем многосвязного управления / М.В. Мееров, Б.Л. Литвак. – М.: Наука, 1972. – 344 с.

#### Благодарности

Исследование проводится при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания образовательным организациям высшего образования № 8.5701.2017/БЧ.

## Improving the efficiency of multichannel systems based on the coordination of channel signals

G.S. Voronkov<sup>1</sup>, P.E. Filatov<sup>1</sup>, A.Kh. Sultanov<sup>1</sup>, R.V. Kutluyarov<sup>1</sup>, I.L. Vinogradova<sup>1</sup>,  
I.V. Kuznetsov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ufa State Aviation Technical University, Karl Marks street 12, Ufa, Russia, 450008

**Abstract.** A method for improving the energy efficiency and noise immunity of multichannel systems, based on the overall coordination of channel signals, is described. To coordinate the signals, a coordinating matrix is used, whose elements are the cross-correlation coefficients of signals from different channels. The possibility of reducing the dynamic range of channel signals while maintaining the quality of communication is shown. The possibility of synthesizing invariant (with an unlimited transfer ratio in separate channels) of coordinated group DPCM codecs with channels of the same type is shown.