

УДК 621.391.27

## КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД МНОГОКАНАЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВОЙ И АНАЛОГОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

**Кейстович Александр Владимирович**

доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник  
ФНПЦ АО «Научно-производственное предприятие «Полёт».

*E-mail:* polyot@atnn.ru.

**Комяков Алексей Владимирович**

кандидат технических наук, генеральный директор ФНПЦ АО  
«Научно-производственное предприятие «Полёт».

*E-mail:* komyakov@npp-polyot.ru.

**Измайлова Яна Алексеевна**

кандидат технических наук, начальник отдела научно-технической информации и управления  
интеллектуальной собственностью ФНПЦ АО «Научно-производственное предприятие «Полёт».

*E-mail:* patent@npp-polyot.ru.

*Адрес:* 603950, Россия, г. Нижний Новгород, ГСП-462, пл. Комсомольская, 1.

*Аннотация:* Для создания межобъектовых линий связи предложен вариант построения многоканальной системы передачи информации и процедуры преобразования аналоговых сигналов в дискретные с помощью метода фазово-импульсной модуляции, не требующие на приёмной стороне восстановления тактовых импульсов. Для уплотнения поступающих сигналов с выходов фазово-импульсного модулятора и с выходов источников цифровых данных предложен способ асинхронного дифференциально-кодowego разделения каналов, заключающийся в том, что сигналу в каждом канале задаётся свой приоритет, в зависимости от которого он устанавливается в очередь для передачи. Вид приоритета – относительный, при котором при поступлении более приоритетного сообщения передача менее приоритетного не прекращается, а ожидается время окончания передачи и затем передаётся более приоритетное сообщение. Предложенный метод позволяет передавать не только фронт, но и спад дискретного сигнала. Приведены математические выражения для расчёта максимально возможного числа каналов группового уплотнения при использовании предложенного способа кодowego разделения каналов, которое зависит от заданной величины вероятности ошибочного разделения  $P_{ош.р.}$ . Наиболее целесообразно использовать предложенный способ многоканальной передачи цифровой и аналоговой информации в межобъектовых волоконно-оптических системах передачи информации.

*Ключевые слова:* фазово-импульсная модуляция, кодowego разделение каналов, уплотнение каналов, способ многоканальной передачи, групповое уплотнение.

При организации межобъектовых и локальных линий связи часто сталкиваются с необходимостью объединения разнообразной информации от множества источников и передачи её удалённым объектам. При традиционном построении таких систем последовательность операций с сигналами выглядела бы следующим образом: преобразование аналоговых сигналов в цифровые с помощью технологии ИКМ, а затем объединение всех дискретных посылок в групповой сигнал с помощью временного или кодowego разделения каналов. На приёмной стороне для восстановления исходных сообщений выполняются обратные, ука-

занным выше, операции.

Рассмотрим один из возможных комбинированных методов многоканальной передачи аналоговой и цифровой информации, который заключается в следующем. Аналоговые речевые сигналы преобразуются в дискретные с помощью метода фазово-импульсной модуляции (ФИМ) – это модуляция положением выходного импульса в зависимости от амплитуды сигнала на входе в момент времени пересечения модулирующим напряжением передаваемого непрерывного сигнала. В качестве модулирующего сигнала может быть использовано напряжение треугольной или синусоидальной

формы (рис. 1, а). При этом виде модуляции временной сдвиг импульсов  $\Delta t_k$  на выходе модулятора относительно тактовых импульсов пропорционален значению модулирующего напряжения в момент формирования выходного сигнала (рис. 1, б) [1–4]. Затем на приёмной стороне для увеличения мощности низкочастотных спектральных составляющих эти импульсы расширяются до длительности, равной величине половины тактового интервала или половине периода модулирующей синусоиды (рис. 1, в). Низкочастотные спектральные составляющие, характеризующие передаваемый непрерывный сигнал, выделяются фильтром нижних частот и после соответствующего преобразования формата передаются получателю информации. Момент  $t_k$  появления  $k$ -го импульса при модуляции синусоидальным напряжением для ФИМ определяется из выражения:

$$t_k = \kappa T_i + D t_m \sin \Omega t_k,$$

где  $T_i$  – усреднённый период следования импульсов;  $\Delta t_m$  – максимальная девиация импульсов;  $\Omega$  – круговая частота модулирующего напряжения. Частота модулирующего напряжения  $\Omega$  в соответствии с теоремой Котельникова выбирается более чем в 2 раза больше наивысшей частоты спектра передаваемого сигнала. Например, при наивысшей частоте спектра передаваемого телефонного сигнала 3,4 кГц, можно выбрать частоту модулирующего напряжения  $\Omega$ , равную 8 кГц.

В многоканальных радиорелейных линиях связи с ФИМ величина  $\Delta t_m$  ограничена той частью тактового интервала, который отведён

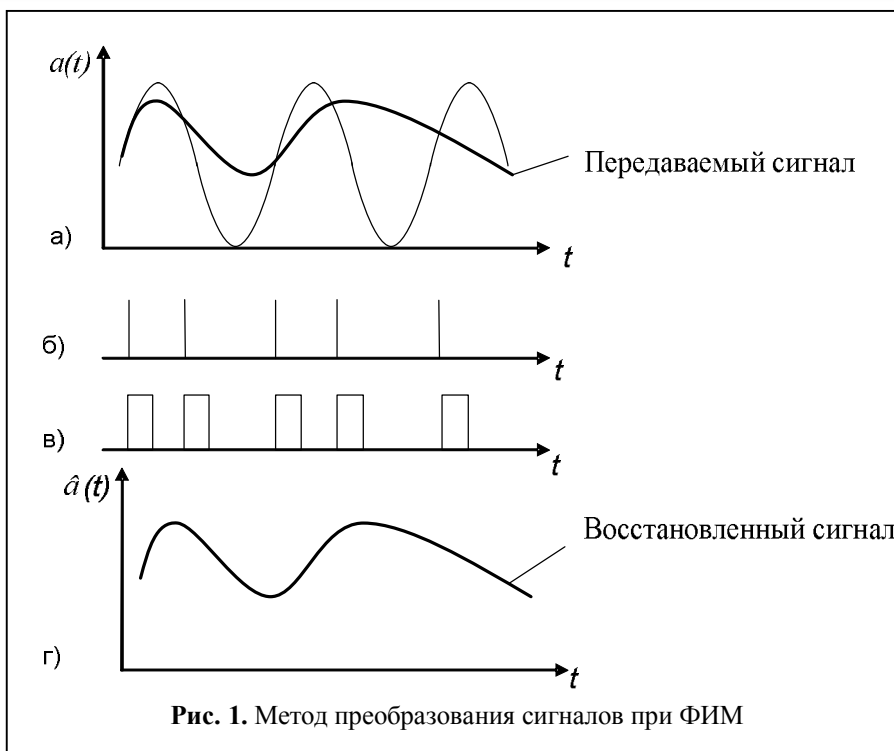


Рис. 1. Метод преобразования сигналов при ФИМ

для данного канала  $T_i/N$ . В асинхронно-адресных системах девиация может быть не более  $\frac{T_i}{2} - t_a$ , где  $t_a$  – длительность адресной группы. Многоканальные системы связи с ФИМ могут быть использованы для передачи сигналов оперативно-командной связи между объектами системы управления воздушным движением.

Последовательность прямоугольных импульсов, модулированных синусоидальным напряжением, можно записать в виде [4]:

$$F(t) = U \frac{\tau}{T_i} + \frac{2U \Delta t_m}{T_i} \sin \frac{\Omega \tau}{2} \cos \left( \Omega t - \frac{\Omega \tau}{T_i} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{2U}{m\pi} I_n \left( m \frac{2\pi \Delta t_m}{T_i} \sin \frac{\Omega_{mn} \tau}{2} \times \right. \\ \left. \times \cos \left( \Omega_{mn} t - \frac{\Omega_{mn} \tau}{2} \right) \right),$$

где  $U$  – амплитуда импульсов;  $\tau$  – длительность импульсов;  $I_n$  – функция Бесселя первого рода  $n$ -го порядка;  $\frac{\Omega_{mn} \tau}{2}$  – фазовый угол;  $\Omega_{mn} = m \Omega_i \pm n \Omega$ ;  $n$  – номер гармоники модулирующего сигнала;  $m$  – номер гармоники так-

товой частоты.

Воздействие фазово-импульсной модуляции на спектр импульсной последовательности состоит в частотной модуляции каждой гармонической составляющей спектра, в том числе и постоянной составляющей. Распределение гармоник внутри спектра при фазово-импульсной модуляции будет неоднородным. Фазовый спектр будет изменяться на каждой частоте на величину, равную угловой частоте, умноженной на сдвиг по времени. Модуляция импульса по длительности будет оказывать воздействие на амплитудный спектр, изменяя ширину спектра обратно пропорционально длительности импульса. Симметричное изменение длительности импульса относительно его центра не будет влиять на фазовый спектр [1–6].

Энергетический спектр последовательности прямоугольных импульсов при ФИМ с экспоненциальным распределением пауз между импульсами определяется следующим выражением [4]:

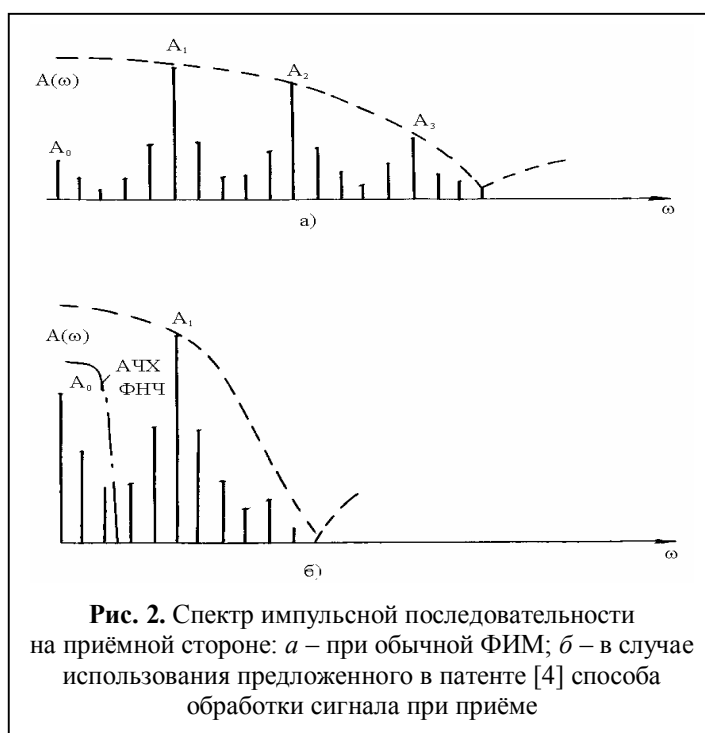
$$A(\omega) = \left[ \frac{2\nu^2\tau^2}{T} \right] \cdot \left[ \frac{\sin\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)}{\frac{\omega\tau}{2}} \right]^2 \times$$

$$\times \frac{1}{1 + \left[ 2 \frac{\sin(\omega\tau)}{\omega(T-\tau)} \right] + \left[ \frac{\sin\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)}{\omega^2(T-\tau)^2} \right]}.$$

где  $T = \frac{1}{Z_n}$ ,  $Z_n$  – число ложных импульсов в единицу времени.

На рис. 2,а приведена начальная часть спектра импульсной последовательности при обычной ФИМ [4], а на рис. 2,б – то же для ФИМ, способ обработки сигналов в которой предложен в патентах [7, 8]. Сравнение спектров последовательностей импульсов на рис. 2,а и рис. 2,б показывает, что

уровень низкочастотной полезной компоненты в предложенном в патенте [4] методе выше, чем в обычном. Выделение исходного сигнала на приёмной стороне основано на особенностях спектра ФИМ-сигнала. После приёма последовательность коротких импульсов переформируется в последовательность со средней скважностью 2, мощность полезных низкочастотных составляющих в видеоспектре у которой на порядок выше, чем у сигнала с ФИМ [5, 6]. Полученный сигнал фильтруется в фильтре нижних частот (ФНЧ), частота среза которого равна половине частоты повторения тактовых импульсов или периода модулирующей синусоиды. Расчёты, проведённые авторами книги [1], показывают, что при вероятности ошибочного приёма на бит в канале связи  $P_0 < 10^{-4}$  ложные импульсы оказывают большее влияние на уровень внутрисистемных помех, чем пропадание информационных. Величина отношения сигнал/шум  $q$  при удлинении импульсов на приёмной стороне, модулированных случайным процессом с нулевым средним, в соответствии с рассматриваемым способом модуляции, зависит от числа ложных импульсов в единицу времени  $Z_n$  и величины



**Рис. 2.** Спектр импульсной последовательности на приёмной стороне: а – при обычной ФИМ; б – в случае использования предложенного в патенте [4] способа обработки сигнала при приёме

максимальной девиации импульсов  $\Delta t_m$  [4]:

$$q = 3,7 \cdot 10^{-2} \frac{1}{Z_n \cdot \Delta t_m}.$$

Из этого выражения видно, что величина  $q$  тем больше, чем меньше значение  $Z_n$  и  $\Delta t_m$ . Следовательно, предложенный метод преобразования аналогового сигнала в дискретный и из дискретного в аналоговый наиболее подходит для волоконно-оптических систем передачи информации, имеющих малую вероятность ошибочного приёма  $P_o \approx 10^{-9}$  и предназначенных для трансляции по световодной линии связи цифровых потоков информации со скоростью (100–1000) Мбит/с.

Дальнейшую процедуру уплотнения импульсов с выхода фазово-импульсного модулятора можно осуществить с помощью кодового разделения каналов (КРК). Рассмотрим подробнее процедуру преобразования речевых и цифровых сигналов в многоканальной системе с кодовым разделением каналов. Последовательность операций, проводимых над передаваемыми сигналами, представлена на структурной схеме (рис. 3). Первой операцией является согласование уровня поступающих сигналов со входами фазово-импульсного модулятора для речевых сообщений и со входами устройства объединения-уплотнения – для цифровых данных. Необходимость этой операции вызвана многообразием существующих интерфейсов источников информации: абонентские связные пункты имеют двух- или четырёхпроводные окончания, вид цифровых сообщений с датчиков абонентов может быть в соответствии с требованиями стыков Ethernet, RS-232C, RS-422, МКИО (ГОСТ Р-52070-2003), ARINC-429, С1-ТЛГ и других.

Аналоговые (речевые) сигналы преобразуются в дискретные с помощью метода фазово-импульсной модуляции. На передающей стороне процедуры обработки аналогового сигнала стандартные: сравнение амплитуд модулируемого и модулирующего сигналов, определение момента времени совпадения амплитуд указанных сигналов и формирование коротко-

го (по сравнению с периодом модулирующего напряжения) импульса. В качестве модулирующего сигнала предложено использовать напряжения треугольной или синусоидальной формы, с частотой повторения в (2,5–3) раза выше максимальной частоты спектра передаваемого сигнала [4].

Выделение исходного сигнала на приёмной стороне основано на особенностях спектра ФИМ-сигнала. После приёма последовательность коротких импульсов переформируется в последовательность со средней скважностью 2, преобразуется в амплитудно-импульсный модулированный сигнал, мощность полезных составляющих в видеоспектре у которого на порядок выше, чем у ФИМ-сигнала. Полученный сигнал фильтруется в фильтре нижних частот (ФНЧ), частота среза которого равна половине частоты повторения тактовых импульсов. С выхода ФНЧ исходный сигнал восстанавливается и поступает требуемому абоненту. Отличие этого метода преобразования аналоговых сигналов в дискретные от известных заключается в том, что при восстановлении исходного сообщения на приёмной стороне не требуется формировать синхроимпульсы, так как аналоговые сигналы выделяются из принятых с помощью фильтра нижних частот.

На следующем этапе дискретные сигналы с выходов фазово-импульсных модуляторов и последовательности цифровой информации нормализованной амплитуды распределяются по каналам двух видов, предназначенных для передачи временных положений фронта и спада или только положения фронта импульсов соответственно. Для первого вида каналов операции уплотнения предшествует операция дифференцирования поступающих сигналов для выделения положения фронта и спада, а для второго вида – только для выделения положения фронта. Конкретное распределение по каналам осуществляется в зависимости от требуемой точности передачи временного положения фронта или спада импульса. Наивысшим относительным приоритетом обладает

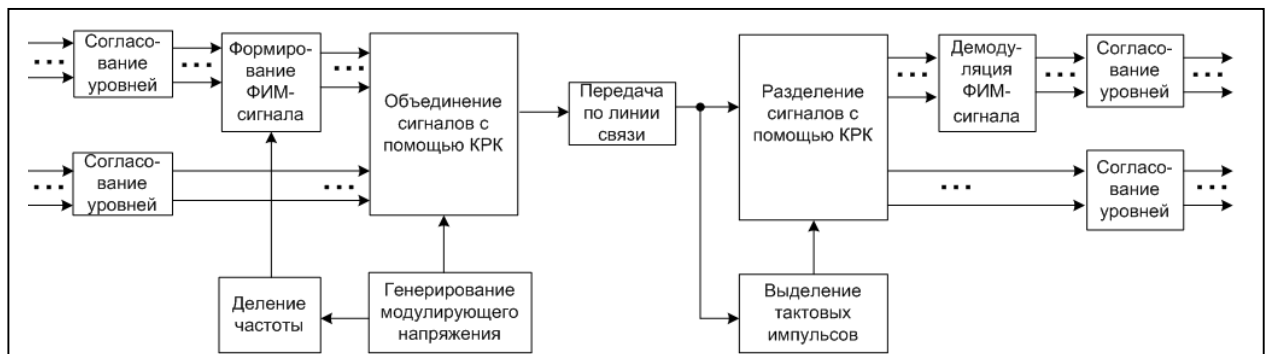


Рис. 3. Процедуры обработки сигналов при комбинированном методе многоканальной передачи цифровой и аналоговой информации

канал с номером «1». С увеличением номера канала уровень приоритета снижается. Относительность приоритета показывает то, что при поступлении сигнала с более высоким приоритетом формирование кода менее важного сообщения не прерывается. Операция кодового уплотнения заключается в следующем. Сигналам (в зависимости от их приоритета) каждого из каналов ставится в соответствие определенный код, который является признаком для выделения сообщения на приёмной стороне [5, 6].

Рассмотрим модель устройства, реализующего предлагаемый метод кодового разделения. Пусть входные информационные потоки разбиваются на  $(m + 1)$  блок  $X[\chi] = \{X_i[\chi]\}_{i=1}^{m+1}$ , где  $X_i[\chi] = \{x_{i-1}^+ \forall i, \chi = \overline{1, n}$ . Каждый вектор  $X[\chi]$  преобразуется в цифровое сообщение  $\bar{X}[\chi] = \{\dot{X}[\chi], a[\chi], K[\chi]\}$  длины  $nR$ , содержащее адресную и ключевую части. Адресная часть сообщения  $a[\chi] = \{a_i[\chi]\}_{i=m+2}^{l+m+1}$ , где  $a_i[\chi] = \{x_{i-1}^+, \forall i, l = \lceil \log_2 N + 1 \rceil$ , необходима для маркировки номера  $\chi$ -го парциального канала системы уплотнения, а ключевые части  $K[\chi] = \{K_i[\chi]\}_{i=l+m+2}^{nR}$ , где  $K_i[\chi] = \{x_{i-1}^+, \forall i, -$  для повышения помехоустойчивости системы уплотнения,  $m$  – размерность информационного блока в каждом парциальном канале,  $m \leq (nR - \lceil \log_2 N \rceil - n)$ .

Система нелинейных уравнений определяет процедуры обработки сигналов:

$$Y(x) = \{Y_i(x) = \text{Sign} \sum_{\chi=1}^N X_{m+1}[\chi] \prod_{i=1}^m X_i[\chi]^{g_{ij}} \times \prod_{i=m+2}^l a_i[\chi]^{g_{ij}} \prod_{i=l+1}^{nR} K_i[\chi]^{g_{ij}}\}_{j=1}^n, \quad X = \{X[\chi]\}_{\chi=1}^{n(1-R)} \quad (1)$$

где  $G = \{g_{ij}\}$  – порождающая  $(nR \times n)$  матрица линейного кода  $Y(n, R)$ , определяющая структуру преобразований при кодовом уплотнении каналов;  $n$  – длина;  $R$  – скорость кода;  $Y(n, R)$ ;  $Y(x)$  – групповое сообщение;  $X = \{x_1[1], \dots, x_{m+1}[1], x_1[2], \dots, x_{m+1}[2], \dots, x_1[N], \dots, x_{m+1}[N]\}$  – расширенный вектор размерности  $(m + 1)N$ ,  $X = \{x_i\}_{i=1}^{(m+1)N}$ .

При решении уравнения (1) для линейных кодов, лежащих на границе Плоткина, получена вероятность ошибочного разделения:

$$P_{oup} = 2^{nR} \left[ 1 - F \left( \sqrt{\frac{8}{N\sqrt{3}}} n(2^{nR} - 1) 2^{-nR} \right) \right],$$

где  $F()$  – функция Лапласа.

Исследования показали, что число уплотняемых каналов ограничено и подчиняется неравенству:

$$N \leq \left\lfloor \frac{8}{\sqrt{3}} n^2 (2^{nR} - 1)^2 2^{-2nR} (a + 2,515517 + 0,80288853a + 0,0103289a^3)(1 - 1,432788a + 0,189269a^2 + 0,0011308a^3)^{-1} \right\rfloor,$$

где  $a = \sqrt{-2 \ln(P_{oup})}$ ,  $\lfloor * \rfloor$  – целая часть числа.

Для упрощения синхронизации процесса декодирования группового сигнала на приёмной стороне в случае применения волоконно-оптической линии связи могут быть использованы возможности балансных самосинхронизирующихся кодов "Манчестер-II", СМІ и других. При необходимости организации дуплексной связи последовательность процессов обработки сигналов аналогична показанной выше, а направление передачи информации – противоположное.

При передаче дискретных сигналов с использованием метода кодового разделения каналов информационный блок может отсутствовать, так как наличие адресной части сообщения соответствует присутствию в данный момент времени соответствующего импульса, а в случае применения асинхронного дифференциального метода КРК – фронту или спаду передаваемого сигнала [9–12].

Возможность реализации предложенного способа многоканальной передачи цифровой и аналоговой информации подтверждена положительными результатами испытаний межобъектовой волоконно-оптической системы передачи информации, обработка сигналов в которой осуществляется в соответствии с предложенным методом [9].

### Литература

1. Цифровые системы передачи / В.В. Крухмалев и др. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 350 с.

2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е испр.: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. 104 с.

3. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Советское радио, 1970. 727 с.

4. Вендиктов М.Д., Марков В.В., Эйдус. Г.С. Асинхронные адресные системы связи. М.: Связь, 1968. 271 с.

5. Кейстович А.В., Комяков А.В. Системы и техника радиосвязи в авиации: учеб. пособие. Нижний Новгород: НГТУ, 2012. 226 с.

6. Кейстович А.В., Милов В.Р. Виды радиодоступа в системах подвижной связи. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 278 с.

7. Патент РФ № 2030834. Световодная система передачи аналоговой информации. А.В. Кейстович, В.С. Ноздрин. БИ № 7, 1995.

8. Патент РФ № 2064222. Устройство для передачи аналоговой информации. А.В. Кейстович, В.В. Малышев, А.В. Семашко, А.А. Кейстович. БИ № 20, 1996.

9. Кейстович А.В., Модин Г.К., Кучеров. Ю.С. Опыт разработки унифицированной ВОСПИ // Вопросы радиоэлектроники. 1992. Вып.1, С. 103–109.

10. Кейстович А.В. Использование волоконно-оптических элементов в радиосистемах // Всесоюзная конференция "Проблемы измерительной техники в волоконной оптике": Тез. докл., Н. Новгород: ННИПИ, 1991, - С.131.

11. Кейстович А.В. Методы уплотнения сигналов в волоконно-оптических системах передачи информации // Всесоюзная конференция "Проблемы измерительной техники в волоконной оптике": Тез. докл., Н. Новгород: ННИПИ. 1991. С. 131–132.

12. Кейстович А.В. Метод многоканальной передачи цифровой и аналоговой информации // VI международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Тез. докл. Т. 2., Воронеж. 2000. С. 793–797.

Поступила 21 мая 2019 г.

English

## COMBINED METHOD FOR MULTI-CHANNEL TRANSMISSION OF DIGITAL AND ANALOG DATA

**Keystovich Alexander Vladimirovich** – Doctor of Engineering, Associate Professor; Chief Researcher of JSC "POLYOT Research & Production Company".

*E-mail:* polyot@atnn.ru.

**Komyakov Alexey Vladimirovich** – Candidate of Engineering Sciences, General Director, JSC "POLYOT Research & Production Company".

*E-mail:* komyakov@npp-polyot.ru.

**Izmaylova Yana Alexeyevna** – Candidate of Engineering Sciences, Department Head of Scientific & Technical Information and Intellectual Property Management, JSC "POLYOT Research & Production Company".

E-mail: patent@npp-polyot.ru.

Address: 443086, Samara, Moscow Highway, 34.

**Abstract:** There often arises the need to combine various data from multiple sources and transmit it to remote sites when arranging facility-based and local communication lines. Signal operation sequence with traditional constructing such systems is as follows: first comes analog signal conversion into digital ones using pulse-coded modulation (PCM) technology, and then combining all discrete parcels into a group signal using time or code channel division. And to restore original messages the reverse operations to specified above are performed on the receiver side. The option is proposed for constructing multichannel data transmission system and conversion procedure of analog signals into discrete ones using pulse position modulation method, which do not require timed pulses recovery on the receiver side. Combined method for multi-channel transmission of digital and analog data is as follows. Analog speech signals are converted into discrete signals using phase position modulation (PPM) – that is the modulation through the position of output pulse depending on the input signal amplitude at the moment of overlapping transmitted continuous signal by the pulsing voltage. The voltage of triangular or sinusoidal shape can be used as a modulating signal. Extraction of the original signal on the receiver side is based on PPM signal spectral features. The difference of the proposed method of converting analog signals into discrete ones from the known methods lies in the fact that when restoring the original message on the receiver side there is no need to form synchronizing pulses, since analog signals are extracted from the received ones by low-pass filter. Feasibility of the proposed method for multichannel transmission of digital and analog data is confirmed by the positive test results of facility-based fiber-optical transmission system, in which the signal processing is performed according to the proposed method.

**Keywords:** phase position modulation, channel code division, channel multiplexing.

### References

1. Digital transmission systems / *V.V. Krukhmalev et al.* Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007. 350 p.
2. *Sklar B.* Digital communication. Theoretical fundamentals and practical application. 2nd Ed. Rev. Transl. from Engl. Moscow: Publishing house "Williams", 2003. 104 p.
3. *Fink L.M.* Transmission theory of discrete messages. Moscow: Sovetskoye radio, 1970. 727 p.
4. *Venidiktov M.D., Markov V.V., Eidus. G.S.* Asynchronous address communication systems. Moscow: Communication, 1968. 271 p.
5. *Keystovich A.V., Komyakov A.V.* Aircraft radio communication systems and equipment: textbook. Nizhny Novgorod: NSTU, 2012. 236 p.
6. *Keystovich A.V., Milov V.R.* Kinds of radio access in mobile communication systems. Textbook for higher education institutions /M.: Goryachaya liniya – Telekom, 2015. 278 p.
7. RF Patent No. 2030834. Analog communication lightwave system. *A.V. Keystovich, V.S. Nozdrin.* Bul. No.7, 1995.
8. RF Patent No. 2064222. Analog data transmission unit. *A.V. Keystovich, V.V. Malyshev, A.V. Semashko, A.A. Keystovich.* Bul. No. 20, 1996.
9. *Keystovich A.V., Modin G.K., Kucherov Yu.S.* Development experience of unified FOTS. Problems of radio electronics. 1992. Iss.1, Pp. 103–109.
10. *Keystovich A.V.* Using fiber-optic elements in radio systems. All-Union Conference "Problems of measurement equipment in fiber optics ": Abstracts. N. Novgorod: NNIEM, 1991, P. 131.
11. *Keystovich A.V.* Signal multiplexing methods in fiber-optic communication systems. All-Union Conference "Problems of measurement equipment in fiber optics ": Abstracts. N. Novgorod: NNIEM. 1991. Pp. 131–132.
12. *Keystovich A.V.* Method of multi-channel transmission for digital and analog data. VI International Scientific and Technical Conference "Radiolocation, navigation, communication". Abstracts. Vol. 2. Voronezh. 2000. Pp. 793–797.