

УДК 621.391.3

## Принципы построения связного оборудования систем телемеханики с линейной топологией на базе составных кабельных линий связи

Точилев В. Н.<sup>1</sup>, Бойков М. С.<sup>1</sup> ✉, Лукичев М. П.<sup>2</sup>, Ташчи Р. Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

<sup>2</sup>ЗАО «МГП «ИМСАТ»  
Санкт-Петербург, 190020, Российская Федерация

**Постановка задачи.** Требования оперативности обмена данными в протяженных проводных системах контроля и управления без возможности замены существующих линий связи предполагают модификацию соответствующих методов реализации оборудования. **Целью** работы является выбор способа преобразования исходного цифрового сигнала к виду, пригодному для ввода-вывода в линейный тракт со множеством подключенных к линии абонентов. **Полученные результаты.** Описан способ модуляции и демодуляции, обеспечивающий обмен данными между абонентами при динамическом диапазоне сигналов на входах приемников до 60 дБ и высоком уровне межсимвольных помех. Представлен вариант реализации приемо-передающего оборудования на базе доступных на рынке комплектующих. Разработана программа процессора приемника, обеспечивающая адаптацию алгоритма во всем диапазоне протяженностей и состава линий связи и скоростей передачи данных 4800÷9600 кбит/с. **Новизна.** В отличие от ЧПИ (трехуровневый сигнал с чередованием полярности импульсов), верхняя частота спектра полученного сигнала увеличивается только в 1,25 раза, и сигнал является двухуровневым, что обеспечивает его затухание на линии предельной длины приблизительно на 15 дБ меньше чем у ЧПИ. **Практическая / теоретическая значимость.** Материал может быть полезен для разработчиков аппаратуры телемеханики использующей проводные каналы связи.

**Ключевые слова:** проводная линия, линейный сигнал, способ кодирования, способ модуляции, способ демодуляции, цифровая обработка сигналов, частотная манипуляция, сопротивление шлейфа, затухание сигнала, контролируемый пункт, диспетчерский пункт

### Введение

Вопросы построения локальных систем телемеханики достаточно подробно проработаны и элементная база реализации интерфейса RS-485 представлена на рынке готовыми приемо-передатчиками (ADM485JR, ADM2483BRWZ, и др.). При ограниченном сопротивлении шлейфа (до сотен Ом) и длительности фронта при смене полярности до 0,5 длительности одиночной посылки сложностей, в основном, не возникает. Системы связи на основе передачи цифровой информации (ИКМ30 и др.) работают, как правило, в условиях больших затуханий сигнала в линии (40 и более дБ) и ограниченной полосы пропускания частот с двумя подключаемыми к линии абонентами. Режим работы преимущественно симплексный с непрерывной передачей в одном направлении. В статье рассматриваются особенности построения систем телемеханики на основе протяженных составных линий связи с множественным подключением абонентов.

#### Библиографическая ссылка на статью:

Точилев В. Н., Бойков М. С., Лукичев М. П., Ташчи Р. Л. Принципы построения связного оборудования систем телемеханики с линейной топологией на базе составных кабельных линий связи // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 2. С. 5. EDN: KBOHUN

#### Reference for citation:

Boikov M., Tochilov V., Lukichev M., Tashchy R. The Principles of Constructing a Communication Equipment with Line Topology on the Base of Composite Communication Lines // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 2. P. 5. EDN: KBOHUN

### Заданные технические характеристики оборудования

Учитывая ограниченность пропускной способности проводных линий связи, неопределенность по набору элементов линии и числа «абонентов» – контролируемых пунктов (КП), исходными данными для проектирования приняты:

- типы кабелей в составе линии – связные телефонные с воздушно-бумажной и полиэтиленовой изоляцией, с диаметрами жил 0,4–0,7 мм;
- протяженность линии (до 20 км при сопротивлении шлейфа до 3 кОм);
- режим работы (полудуплексный по одной линии);
- число КП в системе (до 20);
- период обновления информации на дисплее диспетчерского пункта (ДП) не более 3,5 с;
- объем передаваемой информации от каждого КП до 64 байт (512 бит);
- скорость передачи информации 4,8÷9,6 кбит/с;
- режим опроса (циркулярный и адресный по инициативе ДП);
- затухание сигнала в линии максимальной длины до 60 дБ.

Протяженность линии и требуемый темп функционирования предполагают использование трансформаторной развязки КП и ДП и синхронного режима обмена.

### Типовые требования к свойствам линейного сигнала цифровых систем передачи

В [1–4] при рассмотрении задачи выбора линейного сигнала цифровых систем передачи (ЦСП) предполагается:

- отсутствие постоянной составляющей в энергетическом спектре;
- низкочастотные компоненты должны быть по возможности подавлены;
- отношение верхней частоты к нижней должно быть минимизировано;
- сигнал не должен быть чувствителен к смене полярности;
- сигнал должен содержать достаточное число переходов уровня для синхронизации приемников;
- увеличение верхней частоты спектра сигнала после преобразования к коду передачи должно быть минимизировано ввиду роста затухания в линии (километрическое затухание растет пропорционально корню квадратному увеличению частоты).

### Выбор способа преобразования исходного сигнала к коду передачи с учетом перечисленных требований и особенностей проектируемой аппаратуры

В рекомендации МККТТ (с 1995г. МСЭ-Т) за номером G703 предложено использование в ЦСП сигнала ЧПИ – чередование полярности «единиц» и пассивные «нули». Устранение недостатка данного линейного сигнала, заключающегося в возможности появления продолжительных последовательностей бестоковых посылок «нулей», затрудняющих синхронизацию приемников и работу оборудования регулирования усиления, в указанных выше рекомендациях предлагается посредством замены предельной группы символов «0» комбинацией, содержащей «единицу», полярность которой не соответствует правилу чередования. При вероятности ошибок на регенерационный участок, установленной для цифрового тракта аппаратуры ИКМ30/32 [5] в пределах  $10^{-8}$ , этот способ успешно используется при незначительном коэффициенте размножения ошибок. Столь низкого коэффициента ошибок в рассматриваемой аппаратуре сомнительно ожидать при максимальном затухании сигнала, большем на 20 дБ, чем у сравниваемой, и столь протяженных линиях. Кроме того, сигнал ЧПИ трехуровневый, с пассивным «0», и поэтому требует формата сигнала «с возвращением к нулю», при котором импульсы «единиц» имеют длительность в половину тактового интервала для обеспечения размагничивания сердечника линейного трансформатора при трансляции любых сочетаний символов. Таким образом, верхняя частота спектра удваивается. Поэтому для рассматриваемого применения предлагается использовать вариант частотной манипуляции, при котором «единицы» транслируемой последовательности (рисунок 1) преобразуются в токовые импульсы чередующейся полярности длительностями в тактовый интервал, а «нули» имеют дополнительную смену полярности посередине посылки.

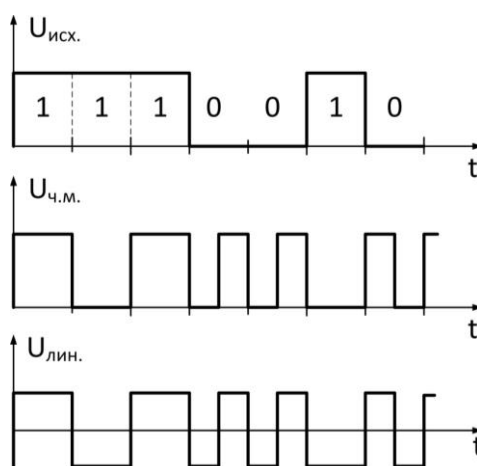


Рис.1. Диаграмма преобразования исходного цифрового сигнала к коду передачи с частотной манипуляцией

Получающаяся последовательность на входе в линию – двухуровневая; не содержит в спектре частотных компонент ниже численно равной половине скорости передачи, но появляется и удвоенная частота при преобразовании «нулей». Для предотвращения появления продолжительных последовательностей «нулей», которые после 3–6 км длины линии связи (в зависимости от типа кабеля) приводят к появлению низкочастотных компонент в спектре сигнала при превышении постоянной времени перезаряда распределенной емкости линии (порядка 0,047 мкФ/км) половину тактового интервала, использовано дополнительное преобразование сигнала кодом 4B5B, повышающим плотность «единиц» (отношение числа 1 к 0 в среднем равно 53/27) и исключающим комбинации из более, чем двух нулей подряд. В таблице 1 приведено предварительное преобразование исходного цифрового сигнала табличным кодом 4B5B.

Таблица 1. Предварительное преобразование исходного цифрового сигнала

№ п/п	Исходная / преобразованная комбинация	№ п/п	Исходная / преобразованная комбинация
1.	1111 / 11111	9.	0111 / 10011
2.	1110 / 11110	10.	0110 / 01101
3.	1101 / 11101	11.	0101 / 01011
4.	1100 / 11011	12.	0100 / 01110
5.	1011 / 10111	13.	0011 / 11010
6.	1010 / 01111	14.	0010 / 10110
7.	1001 / 01010	15.	0001 / 10101
8.	1000 / 11001	16.	0000 / 01001

### Выбор алгоритма демодуляции сигнала

На рисунках 2 и 3 приведены осциллограммы линейных сигналов, снимаемых через линейные трансформаторы, подключаемые к отводам эквивалента линии на расстояниях 2, 10 и 20 км от передатчика на скорости 9,6 кбит/с.

Размах «единиц» преамбулы (см. рисунок 2) – 4,5 В, 150 мВ и 4 мВ, соответственно. Фрагменты содержат окончание преамбулы из 40 посылок «единиц», по которой приемник (реализованный на процессоре архитектуры ARM) подстраивает фазу тактовой частоты под меандр преамбулы на входе порта аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и замеряет величину «размаха», используемую для корректного восстановления принимаемых данных, а также первые символы синхропоследовательности 111111101010.... указанного далее содержания. Ограничение уровня низкочастотных компонент на входах приемников за счет преобразования сигнала кодом 4B5B, использование линейного трансформатора с высокой индуктивностью обмоток (2 × 2,8 Гн) и высокоомный вход дифференциального усилителя (10 кОм) позволили ограничить дополнительное затухание при подключении очередного КП до 0,4 дБ.

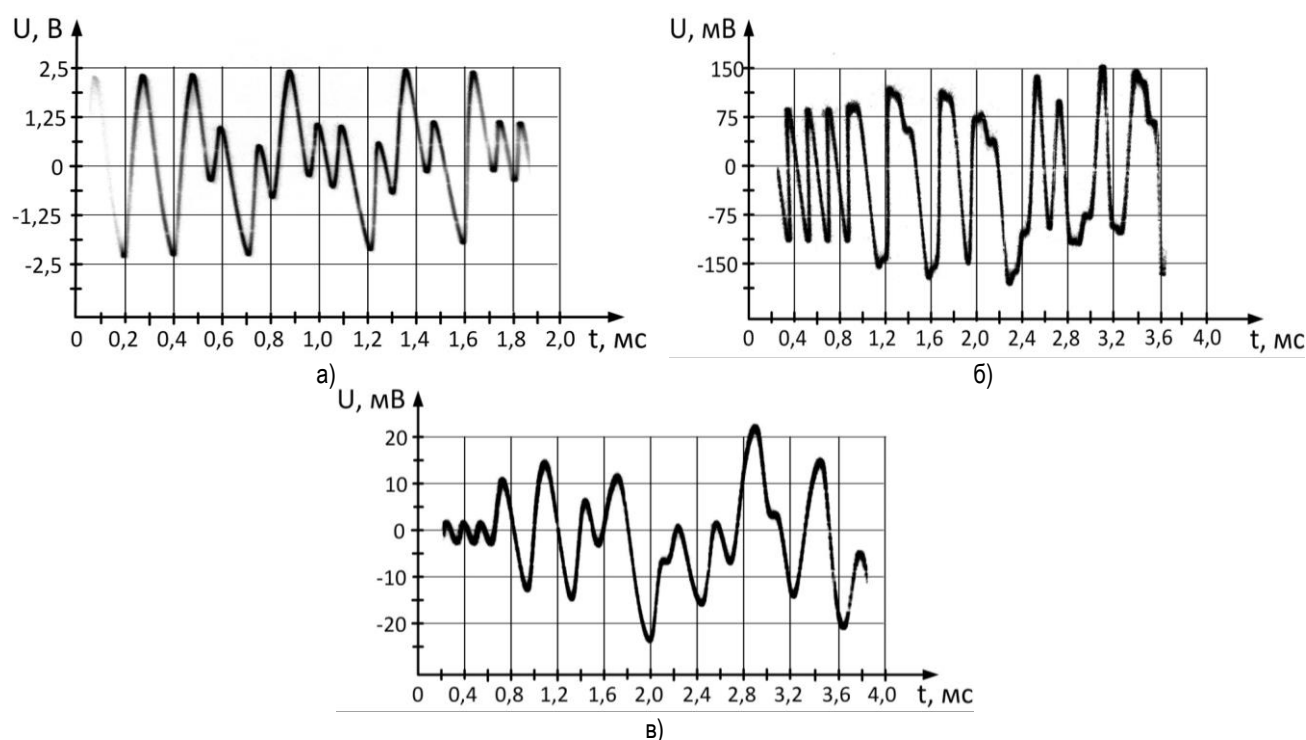


Рис. 2. Осциллограмма линейного сигнала при длине линии 2 км (а), 10 км (б) и 20 км (в) от передатчика

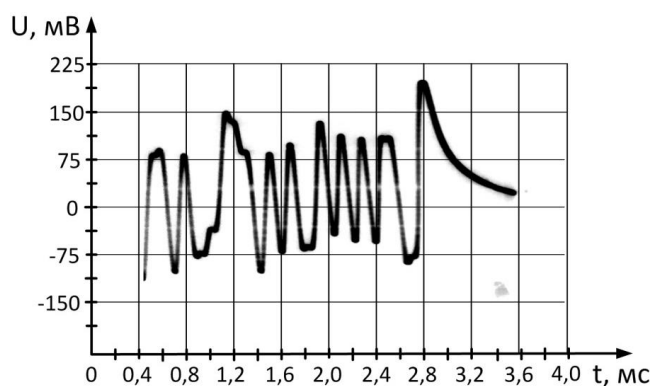


Рис. 3. Осциллограмма линейного сигнала в зоне окончания информационного блока при длине линии 10 км от передатчика

На рисунке 3 приведена осциллограмма завершающей части передаваемого сообщения на дистанции 10 км содержания ..10101, показывающая степень увеличения продолжительности фронта по завершении токовых посылок (драйвер сопряжения портов процессора с линейным трансформатором на длительность тактового интервала замыкает первичную обмотку, а затем переключается в высокоомное состояние), что имеет место при использовании сигналов с пассивным нулем. В диапазоне частот 0,8–5 кГц (на скорости 9,6 кбит/с), занимаемом рассматриваемым сигналом, модуль волнового сопротивления линии связи может быть в пределах 270–1200 Ом, поэтому для объектов с высоким уровнем помех в низкочастотном диапазоне (например, линии вдоль электрифицированных железных дорог) желательно шунтирование их через каждые ~5 км резисторами 0,5 Вт, 1 кОм.

Единого алгоритма демодуляции для линий от 0 до 20 км, меняющегося числа КП и различных скоростей передачи найти не удалось, но производительность процессора позволила даже на скорости 9,6 кбит/с, обрабатывая 16 отсчетов АЦП на бит принимаемых данных, обеспечить прием с использованием девяти алгоритмов одновременно (за время длительности 1-го бита). Решение о приеме синхросигнала принимается по фиксации комбинации FEA564F3, синтезированной по дополнительному условию исключения появления двух и более нулей подряд. Правильность приема данных контролируется 4-байтной контрольной суммой (CRC, аббр. от англ. Cyclic Redundancy Check). Фаза тактовой частоты подстраивается без воздействия на частоту задающего генератора процессора последовательным сдвигом начала цикла из шестнадцати замеров АЦП к выделенным значащим моментам модуля-

ции — смене направления изменения значения напряжения на входе порта АЦП. Погрешность синхронизации составляет при этом 1/16 длительности посылки (104 мкс для скорости 9,6 кбит/с). При отсутствии ошибок подстройка фазы занимает не более 8 тактовых интервалов.

Сеансы передач информации от КП содержат: 40 символов «преамбулы», 32 символа синхронизации, до  $64 \times 8$  данных и 32 символа CRC (два последних компонента дополнительно преобразуются кодом 4B5B); общий объем не превышает 752 бит. Запросы от ДП кратны короче. Поэтому выбрано решение о подстройке синхронизма только по преамбуле, где отсутствует межсимвольная интерференция, серьезно усложняющая эту процедуру.

Взаимная нестабильность частот процессоров задающих генераторов КП и ДП на основе кварцевых генераторов не превышает  $2 \times 10^{-5}$ , что на интервале 712 бит приведет к дополнительной погрешности не более 1,5 %. Время передачи ответа одного КП на скорости 9,6 кбит/с составит 78,3 мс. При паузе между передачами соседних КП в 2 мс время опроса 20 КП составит 1,6 с. Таким образом, даже на скорости 4,8 кбит/с требуемый период обеспечивается.

Амплитудно-частотная характеристика симметричной кабельной линии связи фактически представляет собой фильтр нижних частот. Вследствие этого, затухание «нулей» (передаваемых на удвоенной частоте) на предельной длине линии, выше, по сравнению с затуханием «единиц», не менее чем в 10 раз. Это позволяет производить демодуляцию сигнала как амплитудно-манипулированного.

### Реализация приемника линейного сигнала

Отсчеты АЦП оцифровываются с разрешением в 12 бит и поступают на входы двух фильтров с алгоритмами, соответственно:

Фильтр 1:

$$f1(i) = f1(i - 1) - x(i - 8) + x(i - 24);$$

Фильтр 2:

$$f21(i) = f21(i - 1) + x(i - 8) - x(i - 24),$$

$$f22(i) = f22(i - 1) + x(i) - x(i - 32),$$

$$f2(i) = f22(i)/2 - f(21),$$

где  $x$  — входные данные;  $f1$  — выход фильтра 1;  $f2$  — выход фильтра 2;  $f21$  и  $f22$  — внутренние переменные фильтра 2 (введены с целью разделения алгоритма фильтра 2 на составные части);  $i$  — текущий отсчет;  $i - n$  — значение отсчета на  $n$  выборках раньше.

Фильтр 1 обеспечивает подавление сигнала на удвоенной частоте (нулей), что необходимо на первой половине дистанции. Фильтр 2 улучшает условия приема на линиях большой протяженности за счет подавления низкочастотных компонент (на частотах ниже 500 Гц), где «нули» в достаточной степени подавлены за счет амплитудно-частотной характеристики самой линии.

При превышении значения напряжения на выходе выбранного фильтра в момент регистрации величины порога фиксируется «1», в противном случае — «0». Порогом служит измеренное значение «размаха» на 32 тактовых интервала ранее фиксации синхросигнала с выхода фильтра 2, умноженное на нормирующий коэффициент, значение которого, соответствующее 256, — 100 % величины размаха. Все 9 каналов приема идентичны, отличие в трех переменных: сигнал какого из фильтров используется; используется ли текущее значение на выходе фильтра в момент решения, или разность  $\Delta$  со значением на предыдущем такте; значение нормирующего коэффициента (таблица 2).

Нормирующие коэффициенты выбирались для обеспечения приема на скоростях  $4,8 \div 9,6$  кбит/с для различных протяженностей и состава линий.

Канал 9 — резервный, может быть использован как дополнительный, значения переменных задаются особыми командами. В качестве элемента сопряжения портов процессора с первичной обмоткой линейного трансформатора использовался мостовой драйвер управления двигателем постоянного тока типа DRV8837. Для сохранения уровня подавления симметричных наводок драйвер подключался к трансформатору только на время передачи через коммутатор из двух оптореле с малой проходной емкостью типа CPC1008.

Таблица 2. Значения нормирующих коэффициентов

Номер канала	Номер фильтра	Значение $\Delta$	Нормирующий коэффициент
1	1	Зн	128
2	1	$\Delta$	90
3	1	$\Delta$	130
4	2	$\Delta$	70
5	2	$\Delta$	10
6	2	$\Delta$	95
7	1	Зн	30
8	2	Зн	0
9	1/2	Зн / $\Delta$	0–255

### Заключение

Решена задача передачи телеметрической информации по протяженной проводной линии с множеством подключений, на скорости передачи до 9,6 кбит/с.

Предложен способ преобразования исходной случайной цифровой последовательности данных в линейный сигнал, допускающий возможность множественных подключений КП к общей линии связи без изменений действующих режимов. Разработана программа работы приемника, обеспечивающая функционирование КП и ДП во всем заданном диапазоне количества подключений, скоростей передачи и протяженностей линии.

Проведенные испытания на участке линии вдоль железной дороги «Финляндский вокзал – Ланская» города Санкт-Петербурга подтвердили выше изложенные характеристики оборудования.

### Литература

1. Беллами Дж. Цифровая телефония. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986.
2. Пропис Д.Д. Цифровая связь. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000. 797 с.
3. Дворников С. В., Пшеничников А. В. Формирование спектрально-эффективных сигнальных конструкций в радио-каналах передачи данных контрольно-измерительных комплексов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 3. С. 221–228. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-3-221-228. EDN: YGSOYN
4. Полушин П. А., Раджабов У. М., Лось В. О. О возможности плавной регулировки скорости передачи многоуровневых цифровых сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 1(41). С. 46–54. EDN: YBIBTP
5. Системы передачи ИКМ30. Под ред. Ю. П. Иванова и Л. С. Левина. М.: Радио и связь, 1983.

Статья поступила 30 июля 2024 г.

Одобрена после рецензирования 14 августа 2024 г.

Принята к публикации 21 августа 2024 г.

### Информация об авторах

*Точилев Владимир Николаевич* — старший научный сотрудник НИЛ систем передачи телеметрической информации Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: barb@sut.ru

*Бойков Михаил Сергеевич* — научный сотрудник НИЛ систем передачи телеметрической информации Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: barb@sut.ru

*Лукичев Михаил Петрович* — заместитель главного инженера ЗАО «МГП «ИМКАТ». E-mail: mlukichev@realsys.ru

*Ташчи Руслан Леонидович* — исполнительный директор ЗАО «МГП «ИМКАТ». E-mail: mlukichev@realsys.ru

## The Principles of Constructing A Communication Equipment with Line Topology on the Base of Composite Communication Lines

V. Tochilov<sup>1</sup>, M. Boikov<sup>1</sup> ✉, M. Lukichev<sup>2</sup>, R. Tashchy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

<sup>2</sup>R&D Company 'MGP IMSAT'

St. Petersburg, 190020, Russian Federation

**Problem statement:** *The requirements for the efficiency of data exchange in extended wired monitoring and control systems without the possibility of replacing existing communication lines imply modification of the appropriate methods of equipment implementation. The **purpose** of the work is to choose a method for converting the original digital signal to a form suitable for I/O in a linear path with many subscribers connected to the line. The **results** obtained: A **method** of modulation and demodulation is described, which provides data exchange between subscribers with a dynamic range of signals at receiver inputs up to 60 dB and a high level of intersymbol interference. A variant of the implementation of receiving and transmitting equipment based on components available on the market is presented. A receiver processor program has been developed that provides adaptation of the algorithm over the entire range of lengths and composition of communication lines and data transfer rates of 4800–9600 kbit/s. **Novelty.** Unlike the NPI (a three-level signal with alternating pulse polarity), the upper frequency of the spectrum of the received signal increases only 1.25 times, and the signal is two-level, which ensures its attenuation on a line of maximum length by about 15 dB less than that of the NPI. **Practical / theoretical relevance.** The material may be useful for developers of telemechanics equipment using wired communication channels.*

**Key words:** *wired line, linear signal, encoding method, modulation method, demodulation method, digital signal processing, frequency manipulation, loop resistance, signal attenuation, controlled point, control room*

### Information about Authors

*Tochilov Vladimir* — Senior Research Officer of Telemetry Information Transmission Systems Laboratory (The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: barb@sut.ru

*Boikov Mikle* — Research Office of the Telemetry Information Transmission Systems Laboratory (The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: barb@sut.ru

*Lukichev Mikhail* — Systems engineer, Deputy Chief Engineer (R&D Company 'MGP IMSAT')  
E-mail: mlukichev@realsys.ru

*Tashchi Ruslan* — Executive Director (R&D Company 'MGP IMSAT'). E-mail: mlukichev@realsys.ru