

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.6>

УДК: 621.391

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТОКОЛЬНЫХ БЛОКОВ ДАННЫХ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ АБОНЕНТСКИХ ТЕРМИНАЛОВ

А.В. Кудрин, Г.В. Никитин, А.В. Шишкалов

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13

Статья поступила в редакцию 21 июня 2023 г.

Аннотация. В статье представлена модель формирования протокольных блоков данных управляющих сообщений канала управления динамическим изменением параметров сигналов абонентских терминалов спутниковых систем связи. Модель учитывает динамическое распределение частотно-временного ресурса абонентских терминалов и изменение количества одновременно функционирующих абонентских терминалов в групповом сигнале. Рассмотрены основные принципы функционирования спутниковых систем связи с динамическим изменением параметров сигналов. Представлено описание структуры протокольных блоков данных управляющих сообщений канала управления и их основных структурных элементов. Рассмотрены вопросы вариативности построения структурных элементов управляющих сообщений протокольных блоков данных канала управления. Произведена оценка количества возможных альтернатив структуры протокольных блоков данных управляющих сообщений канала. Результаты, полученные на основе моделирования могут быть использованы для идентификации блоков данных управляющих сообщений канала управления и определения параметров сигналов абонентских терминалов с целью дальнейшего приема и обработки.

Ключевые слова: спутниковые системы связи, абонентский терминал, динамическое изменение параметров сигналов, протокольный блок данных, канал управления.

Автор для переписки: Кудрин Андрей Владимирович, akudrin107@gmail.com

Введение

Важнейшей задачей, решаемой поставщиками услуг спутниковой связи является обеспечение широкополосного доступа в интернет на основе технологии VSAT (Very Small Aperture Terminal) [1]. В связи с возросшими требованиями к пропускной способности каналов связи и ограниченностью частотно-энергетического ресурса, широкое распространение получили спутниковые системы связи (ССС), в которых используется многостанционный доступ (МСД) с динамическим изменением параметров (ДИП) сигналов абонентских терминалов (АТ). Развитие и функционирование СССР с ДИП сигналов, как неотъемлемой части национальной системы связи общего пользования, должны регламентироваться и контролироваться национальными министерствами связи и другими уполномоченными органами в области регулирования радиочастотного спектра и других компетенций.

В настоящее время крупнейшие производители систем спутниковой связи (Hughes, iDirect, ViaSat, Comtech и др.) активно разрабатывают, совершенствуют и внедряют собственные технологии МСД с динамическим изменением параметров сигналов АТ. Компания «HughesNet» внедрила в систему спутниковой связи «Jupiter» фирменную технологию формирования группового сигнала абонентских терминалов «Hughes TDMA Access», компания «Gilat» в системе «SkyEdge-IV» технологию «eSCPC» (elastic SCPC with Gilat-TDMA), компания «ST Engineering iDirect» – в системах связи «Newtec» внедрила технологию МСД «Mx-DMA» (Cross-Dimensional Multiple Access) [2].

В рамках построения СССР на базе оборудования VSAT разработчики основываются на принципах, изложенных в стандартах DVB-RCS и DVB-RCS2 (Return Sattelite Link), при этом значительно расширяя возможности и характеристики систем [3]. В соответствии с принятыми стандартами (DVB-RCS и IPoS), сеть спутниковой связи состоит из центральной земной станции (ЦЗС) и множества АТ. В направлении от ЦЗС к АТ («прямой канал связи») данные передаются всем терминалам в едином мультиплексированном высокоскоростном цифровом потоке в режиме многостанционного доступа

с частотным разделением (МДЧР). От АТ к ЦЗС («обратный канал связи»), данные передаются на множестве несущих частот, каждая из которых разделена на временные слоты, предоставляемые АТ в режиме предоставления доступа по требованию.

Спутниковой системе связи с ДИП сигналов АТ предоставляется частотно-временной ресурс (ЧВР) с учетом требуемой потребности каждого АТ в пропускной способности. Данный подход распределения ЧВР с помощью динамического изменения параметров сигналов АТ позволяет более гибко распределять пропускную способность между АТ, учитывать ожидаемую нагрузку на сеть связи, топологическую структуру сети, величину задержек при предоставлении дополнительного канального ресурса [4].

Несмотря на высокие задержки в управлении, применение динамического изменения параметров сигналов АТ повышает эффективность использования ЧВР при передаче трафика АТ, формируемого различными мультисервисными службами и обладающего неоднородной, нестационарной с долговременной зависимостью структурой [4].

Решение задачи приема и обработки сигналов АТ возможно после проведения идентификации протокольных блоков данных (ПБД) управляющих сообщений (УС) канала управления, передаваемых в групповом цифровом потоке ЦЗС, содержащих данные о назначенных каждому АТ параметрах сигналов. В силу отсутствия стандартизированного протокола передачи данных канала управления, компании-производители спутникового оборудования разрабатывают свои собственные, фирменные протоколы передачи данных канала управления. Данное обстоятельство приводит к широкому разнообразию применяемых протоколов, а, следовательно, и к широкому разнообразию реализаций структур ПБД УС канала управления, описание которых отсутствует в открытом доступе.

Для определения текущих параметров сигналов АТ необходимо выполнить декомпозицию группового цифрового потока, обнаружение и идентификацию ПБД управляющих сообщений канала управления.

Существующие модели формирования ПБД канала управления ССС с многостанционным доступом с временным разделением (МДВР) и МЧ-МДВР [5], не обеспечивают в полной мере решение задач обнаружения ПБД управляющих сообщений канала управления и идентификации их структуры и параметров.

Вопросы динамического перераспределения радиоресурса в спутниковых системах связи рассматривались в работах Е.А. Новикова [4,6], А.А. Ковальского [7], Е.С. Абазиной [8]. Вопросы обнаружения и анализа ПБД каналов управления спутниковых систем связи рассматривались в работах Д.А. Клецкова [5,9]. Вопросы идентификации структуры ПБД рассматривались в работах Г.В. Никитина [10].

В статье изложены пути повышения эффективности контроля в области регулирования радиочастотного спектра ССС с помощью идентификации ПБД УС канала управления на основе разработанной модели формирования ПБД УС канала управления динамическим изменением параметров сигналов абонентских терминалов.

1. Основные структурные элементы протокольных блоков данных управляющих сообщений канала управления динамическим изменением параметров сигналов абонентских терминалов

В случае необходимости изменения информационной скорости передачи данных АТ формирует запрос на изменение текущих параметров сигналов АТ. Для изменения параметров сигналов АТ, ЦЗС передает в групповом цифровом потоке соответствующие управляющие сообщения, составляющие канал управления динамическим изменением параметров сигналов АТ. Схема функционирования спутниковой системы связи, построенной на основе топологии «звезда» представлена на рисунке 1. Станция контроля (СК) обеспечивает прием сигналов как ЦЗС, так и АТ при их электромагнитной доступности.

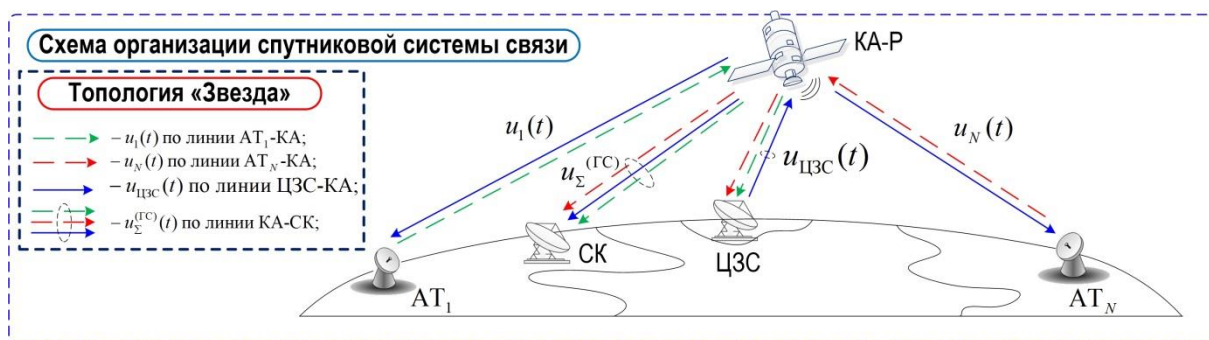


Рис. 1. Схема функционирования спутниковой системы связи с топологией «звезда».

На рисунке 2 представлена спектрограмма радиоизлучений ЦЗС и сигналов АТ спутниковой системы связи с динамическим изменением параметров сигналов.

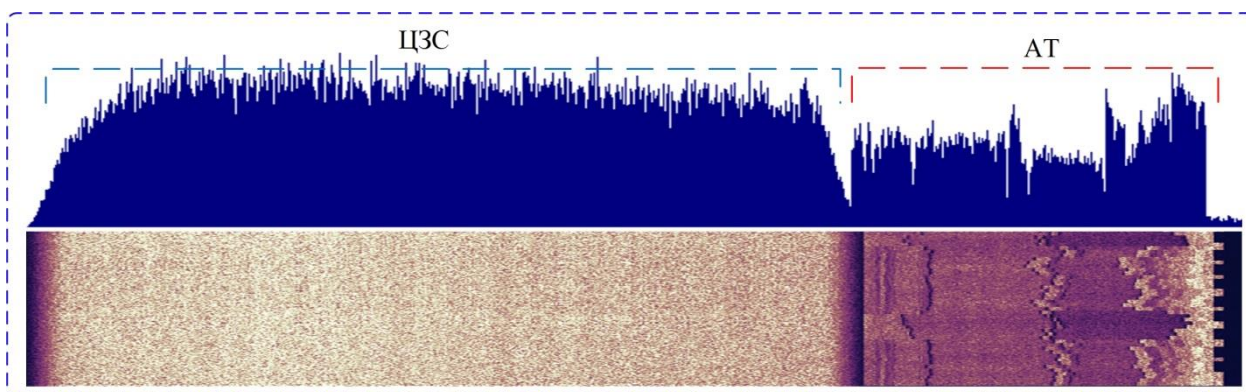


Рис. 2. Спектрограмма радиоизлучений ЦЗС и сигналов АТ спутниковой системы связи с динамическим изменением параметров сигналов.

Каждое управляющее сообщение (УС) содержит структурные элементы (СЭ), характеризующие изменения физических параметров сигналов АТ. Изменение значений, передаваемых в СЭ ПБД управляющих сообщений канала управления, предопределяет изменение параметров сигналов АТ и перераспределение ЧВР всего группового сигнала (ГС) ССС. Принцип изменения параметров сигналов АТ при передаче управляющих сообщений в групповом цифровом потоке представлен на рисунке 3.

В ССС одновременно функционирует несколько АТ, одновременно обслуживаемых системой. Требуемая информация о назначенных АТ параметрах сигналов передается в групповом цифровом потоке ЦЗС с помощью множества ПБД управляющих сообщений канала управления, передаваемых

в моменты времени $T = \{t_1, t_2, \dots, t_j\}$ – множестве моментов времени, определяемых системой ССС.

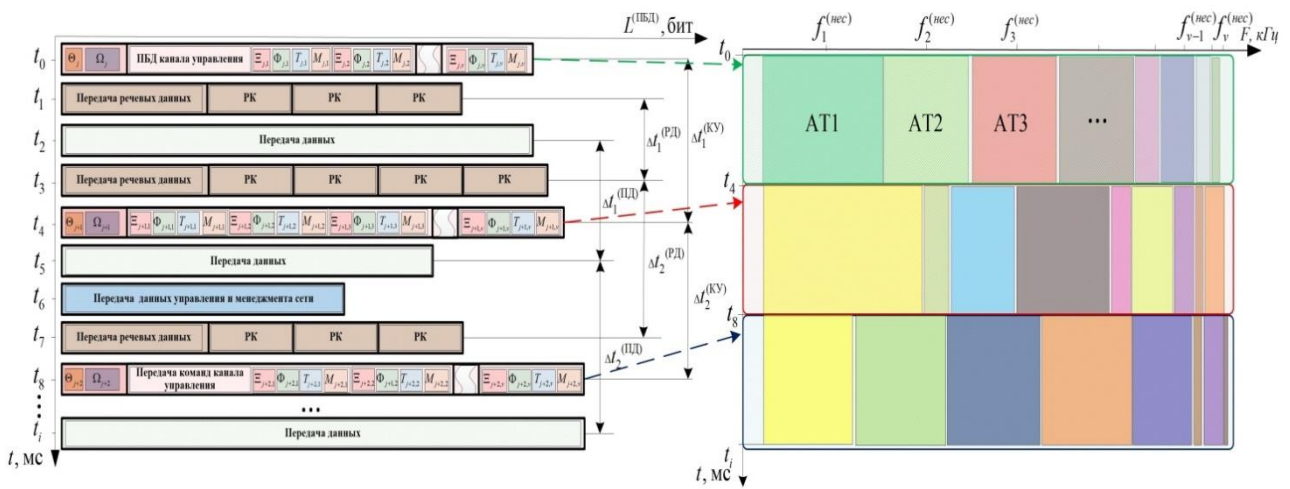


Рис. 3. Пример изменения параметров сигналов АТ при передаче управляющих сообщений в групповом цифровом потоке.

В условиях априорной неопределенности протокола формирования ПБД УС канала управления для идентификации ПБД УС необходимо выполнить декомпозицию группового цифрового потока ЦЗС и выявить передачу данных канала управления [9,11]. В цифровом групповом потоке передаются различные виды трафика: речевые данные, видеоконференцсвязь, передача пользовательских данных, веб-данные, межмашинный обмен данными и т.д. Пример фрагмента передачи группового цифрового потока ЦЗС представлен на рисунке 4. Передача ПБД управляющих сообщений может осуществляться на всех уровнях сетевой модели взаимодействия открытых систем, что усложняет задачу их обнаружения в групповом цифровом потоке.

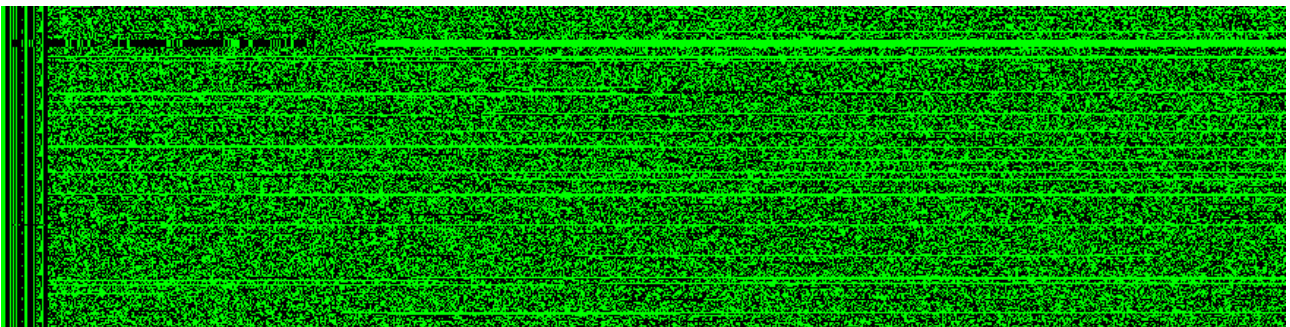


Рис. 4. Фрагмент передачи группового цифрового потока ЦЗС.

После выявления передачи канала управления необходимо определить состав и структуру УС, передаваемых в канале управления, и далее учитывать это при обработке группового сигнала АТ. Фрагмент передачи ПБД УС канала управления динамическим изменением параметров сигналов представлен на рисунке 5.



Рис. 5. Фрагмент передачи протокольного блока данных управляющего сообщения канала управления динамическим изменением параметров сигналов.

Для приема и обработки сигналов АТ и настройки приемного тракта радиоприемных устройств необходимо устранить такие виды сигнальной неопределенности, как, пространственная и временная неопределенность, неопределенность множественного доступа, расширения спектра, модуляционная, корректирующего кодирования. Идентификация ПБД УС канала управления позволит выполнить задачи обнаружения сигнала, распознавания вида модуляции и канального кода. Радиоприемное устройство может осуществлять обнаружение, фильтрацию, оценивание частотно-временных параметров, демодуляцию отдельных частотно-временных интервалов в анализируемом участке частотного диапазона на основе полученных данных из управляющих сообщений канала управления.

Как правило, сигналы АТ ССС объединяются в пул несущих частот с заданной центральной частотой и шириной полосы [3]. Однако, обратные каналы не всегда объединяются в пулы частот, а могут находиться разрозненно относительно друг друга. Данный факт обусловлен необходимостью повышения помехозащищенности подобных систем и возможностью предоставления связного ресурса большему числу абонентов. При этом, в некоторых случаях, ширина полосы частот сигналов АТ может быть

более 350 МГц, а смещение центральной частоты сигналов АТ от излучения обслуживающей ЦЗС достигает более 1 ГГц.

На ПБД канала управления возлагается функция передачи для каждого отдельного АТ следующих параметров сигналов по линии «АТ – КА»:

- идентификатор терминала (адресная часть);
- несущая частота сигнала АТ;
- тактовая частота сигнала АТ;
- вид и параметры модуляции и помехоустойчивого (п/у) кодирования.

ПБД УС канала управления, содержащие различные структурные элементы (СЭ) представляют собой последовательность двоичных символов размером L_{w_j} , кодирующих информацию о требуемых параметрах сигнала АТ.

Размер ПБД L_{w_j} зависит от числа n одновременно функционирующих АТ в ССС, числе передаваемых параметров сигналов АТ и состояния системы в целом.

Таким образом, разрабатываемая модель формирования ПБД канала управления данными должна содержать описание следующих структурных элементов:

- СЭ ПБД «идентификатор длины» Θ , позволяющего получить информацию о размере ПБД канала управления;
- СЭ ПБД «центральная частота» Ω , позволяющего получить информацию о значении центральной частоты пула несущих частот сигналов АТ;
- СЭ ПБД «адресная часть» Ξ , идентификатор АТ, позволяющий производить отбор из множества сегментов ПБД канала управления сегмент ПБД, содержащий параметры определенного АТ;
- СЭ ПБД «несущая частота» Φ , позволяющего получить данные о несущей частоте сигнала АТ. Значение несущей частоты передается в виде отстройки от центральной частоты пула несущих частот сигналов АТ;

- СЭ ПБД «тактовая частота» T , позволяющего получить данные о тактовой частоте сигнала АТ;
- СЭ ПБД «вид модуляции и п/у кодирования» M , позволяющего получить данные о применяемом виде модуляции и параметрах помехоустойчивого кодирования сигналов АТ.

Особенностью структуры ПБД канала управления является формирование его путем объединения заголовка и сегментов данных о параметрах сигналов всех АТ (рисунок 7).

ПБД УС канала управления W_j включает n сегментов, по количеству равному числу одновременно функционирующих АТ ССС. В одном сегменте ПБД передаются параметры сигнала одного соответствующего АТ.



Рис. 7. Фрагмент передачи протокольного блока данных управляющего сообщения канала управления динамическим изменением параметров сигналов.

С учетом вышесказанного ПБД канала управления параметрами сигналов АТ может быть представлен как объединение множеств двоичных последовательностей структурных элементов заголовочной части и сегментов данных ПБД УС канала управления:

$$W_j = Z_j \cup \left(\bigcup_{v=1}^n C_{j,v} \right), \quad (1)$$

$$Z_j = \{ \Theta_j, \Omega_j \}, \quad (2)$$

$$C_{j,v} = \{ \Xi_{j,v}, \Phi_{j,v}, \Gamma_{j,v}, M_{j,v} \}, \quad (3)$$

где W_j – множество двоичных элементов j -го ПБД канала управления;

Z_j – заголовок j -го ПБД УС канала управления;

Θ_j – СЭ «идентификатор длины» j -го ПБД УС канала управления;

- Ω_j – СЭ «центральная частота пула» j -го ПБД УС канала управления;
- $C_{j,v}$ – v -й сегмент j -го ПБД УС канала управления;
- $\Xi_{j,v}$ – СЭ ПБД «адресная часть», $\Xi_{j,v} = \langle \xi_{1,j,v}, \dots, \xi_{l_{\Xi},j,v}, \dots, \xi_{L^{(а)}}_{j,v} \rangle$,
 $\xi_{l_{\Xi},j,v} \in \{0,1\}$;
- $\Phi_{j,v}$ – СЭ ПБД «несущая частота», $\Phi_{j,v} = \langle \phi_{1,j,v}, \dots, \phi_{l_{\Phi},j,v}, \dots, \phi_{L^{(н)}}_{j,v} \rangle$,
 $\phi_{l_{\Phi},j,v} \in \{0,1\}$;
- $T_{j,v}$ – СЭ ПБД «тактовая частота», $T_{j,v} = \langle \tau_{1,j,v}, \dots, \tau_{l_T,j,v}, \dots, \tau_{L^{(т)}}_{j,v} \rangle$,
 $\tau_{l_T,j,v} \in \{0,1\}$;
- $M_{j,v}$ – СЭ ПБД «вид модуляции и помехоустойчивого(п/у) кода»,
 $M_{j,v} = \langle m_{1,j,v}, \dots, m_{l_M,j,v}, \dots, m_{L^{(м)}}_{j,v} \rangle$, $m_{l_M,j,v} \in \{0,1\}$;
- n – количество сегментов в ПБД канала управления.

Формируемая структура заголовка ПБД управляющих сообщений канала управления представлена на рисунке 8.

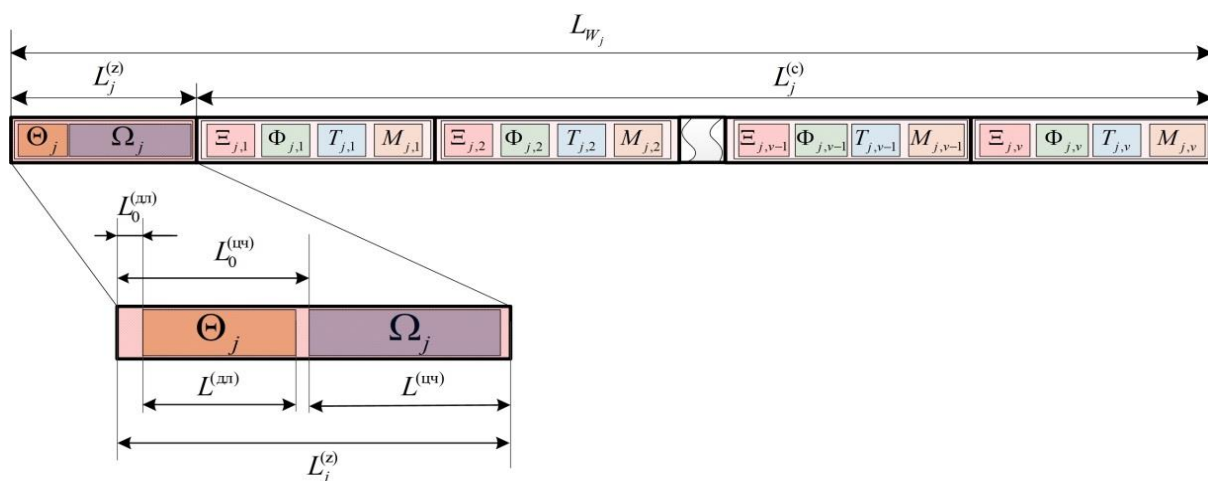


Рис. 8. Структура заголовка ПБД УС канала управления, включающая в себя СЭ «идентификатор длины» и СЭ «центральная частота пула».

В СЭ «идентификатор длины» содержится информация о размере текущего j -го ПБД. Значение СЭ описывается следующим выражением:

$$\Theta_j = \Upsilon^{(\text{дл})}(L_j^{W_j}). \quad (4)$$

В большинстве случаев Θ_j можно описать выражением:

$$\Theta_j = n \cdot L_{j,v}^{(c)} + L_j^{(z)}, \quad (5)$$

где n – количество одновременно функционирующих АТ;

$\Upsilon^{(\text{дл})}$ – функция преобразования двоичной последовательности в значение СЭ «идентификатор длины»;

$L_j^{(z)}$ – размер заголовка j -го ПБД УС канала управления;

$L_{j,v}^{(c)}$ – размер v -го сегмента j -го ПБД УС канала управления.

Сегменты ПБД с параметрами сигналов АТ могут иметь различный размер. Необходимо учитывать, что число одновременно функционирующих АТ в ССС может достигать нескольких десятков. В простейшем случае в СЭ «идентификатор длины» в двоичном виде может указываться число байт, являющееся размером всего ПБД УС канала управления.

В сетях передачи данных максимальный размер полезного блока данных (MTU) составляет 65535 байта, а минимальный размер равен 68 байт [12]. Таким образом, для учета того, что заголовок ПБД может иметь байт-ориентированные размеры СЭ, в рамках модели максимально возможный размер СЭ «идентификатор длины» можно принять равным двум байтам.

Таким образом, размер СЭ «идентификатор длины» варьируется в пределах:

$$L^{(\text{дл})} \in \{l_0^{(\text{дл})}, \dots, l_{\max}^{(\text{дл})}\}. \quad (6)$$

Например, в рамках модели формирования канала управления системы «Newtec» размер СЭ «идентификатор длины» варьируется в пределах от 5 до 16 бит:

$$L^{(\text{дл})} \in \{5, \dots, 16\}. \quad (7)$$

Примеры представления двоичного значения СЭ «идентификатор длины» ПБД канала управления размером 12 бит и ПБД, дефрагментированный на основе полученного значения СЭ представлены на рисунке 9 и 10.

номер : длина	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 : 368	00000000	11000001	1110000	11111000	00000000	00000000	11010001	00000000	00000000	11111010	00000000	00001011	00001000	01011011	10111101	01110000
2 : 368	00000000	11000001	1110001	00000000	00000000	00000000	11010011	00000000	00000000	11111011	00000000	00001011	00001000	01011011	10111101	01110000
3 : 368	00000000	11000001	1110000	11111000	00000000	00000000	11010101	00000000	00000000	11111100	00000000	00001011	00001000	01011011	10111101	01110000

номер : длина	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
1 : 248	0	131	15	31	0	0	139	0	0	95	0	208	16	218	189	14	0	96	156	144	223	161	192	0	32	191	77	106	253	169	255	34	105	128	168	136	116
2 : 256	0	131	143	0	0	0	203	0	0	223	0	208	16	218	189	14	0	96	156	144	223	161	192	0	32	239	77	106	253	169	255	28	232	128	168	136	116
3 : 248	0	131	15	31	0	0	171	0	0	63	0	208	16	218	189	14	0	96	156	144	223	161	192	0	32	47	77	106	253	169	255	164	56	128	40	72	116

Рис. 9. Примеры зависимости значения поля «идентификатор длины» (четыре младших бита 3-го байта и 4-й байт) от размера ПБД канала управления).

В СЭ «центральная частота пула» указывается значение центральной частоты пула всех несущих частот сигналов АТ ССС. Значение несущей частоты сигнала отдельного АТ передается в виде отстройки от центральной частоты пула несущих частот сигналов всех АТ ССС.

Существуют различные варианты представления чисел в двоичном коде (например, прямой или инверсный код, двоичный или двоично-десятичный код, код Голея и т. п.). Порядок отображения значений центральной частоты в десятичном коде можно представить как:

$$\langle \omega_{1,j}, \omega_{2,j}, \dots, \omega_{l,j}, \dots, \omega_{L^{(пч)},j} \rangle = \Upsilon^{(пч)}(\Omega_j), \omega_{l,j} \in \{0,1\}, \tag{8}$$

где Ω_j – значение параметра Ω j -го ПБД УС канала управления;

$\omega_{l,j}$ – l -й двоичный символ СЭ «центральная частота» параметра Ω j -го ПБД УС канала управления;

$\Upsilon^{(пч)}$ – функция преобразования двоичной последовательности в значение СЭ «центральная частота»;

$L^{(пч)}$ – число двоичных символов СЭ «центральная частота».

В настоящее время в ССС на базе оборудования VSAT наиболее широко используются диапазоны частот С, Х, Ku, Ka [1,2,3]. Таким образом, значения несущей частоты сигналов АТ могут достигать значений нескольких десятков ГГц, например, для диапазона Ka по линии связи «АТ – КА» значение может достигать порядка 31 ГГц. В СЭ «центральная частота пула» в двоичном виде

указывается номинал центральной частоты пула несущих частот сигналов АТ по линии «АТ – КА» с точностью до 1 Гц.

Размер СЭ «идентификатор длины» варьируется в пределах:

$$L^{(цч)} \in \{l_0^{(цч)}, \dots, l_{\max}^{(цч)}\}. \quad (9)$$

В рамках модели формирования канала управления на примере системы «Newtec», для кодирования возможных значений центральной частоты по линии «АТ – КА» указанных диапазонов частот необходимо от 4 до 5 байт. Таким образом, размер СЭ «центральная частота пула» варьируется в пределах от 32 до 40 бит:

$$L^{(цч)} \in \{32, \dots, 40\}. \quad (10)$$

Для получения данных о номинале центральной частоты по линии «КА – АТ» необходимо производить перерасчет с учетом частоты переноса приемопередающего оборудования КА.

Примеры двоичного представления СЭ «идентификатор длины» и СЭ «центральная частота» заголовка ПБД УС канала управления представлены на рисунке 10.

Номер	Длина	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	368	00000000	10000011	10001111	00001110	00000000	00000000	11011111	00000000	00000000	10011110	00000000	00001000	00010000	11111010	00100011	00001101
2	368	00000000	10000011	10001111	00001110	00000000	00000000	10111111	00000000	00000000	01011110	00000000	00001000	00010000	11111010	00100011	00001101
3	368	00000000	10000011	10001111	00001110	00000000	00000000	11111111	00000000	00000000	11011110	00000000	00001000	00010000	11111010	00100011	00001101
4	368	00000000	10000011	10001111	00001110	00000000	00000000	10000011	00000000	00000000	00111110	00000000	00001000	00010000	11111010	00100011	00001101
5	368	00000000	10000011	10001111	00001110	00000000	00000000	11000011	00000000	00000000	10111110	00000000	00001000	00010000	11111010	00100011	00001101
6	368	00000000	10000011	10001111	00001110	00000000	00000000	10100011	00000000	00000000	01111110	00000000	00001000	00010000	11111010	00100011	00001101
7	368	00000000	10000011	10001111	00001110	00000000	00000000	11100011	00000000	00000000	11111110	00000000	00001000	00010000	11111010	00100011	00001101
8	368	00000000	10000011	10001111	00001110	00000000	00000000	10010011	00000000	00000000	00000001	00000000	00001000	00010000	11111010	00100011	00001101
9	368	00000000	10000011	10001111	00001110	00000000	00000000	11010011	00000000	00000000	10000001	00000000	00001000	00010000	11111010	00100011	00001101

Рис. 10. Пример двоичного представления СЭ заголовка ПБД УС канала управления.

Число одновременно функционирующих АТ ССС не является постоянным, поэтому количество сегментов j -го ПБД канала управления $S_{j,v}$ не является постоянным для каждого ПБД W_j . Сегменты ПБД, содержащие параметры сигналов АТ, также могут иметь различный размер $L_{j,v}^{(c)}$. Общий вид формируемой структуры сегментов ПБД канала управления представлен на рисунке 11.

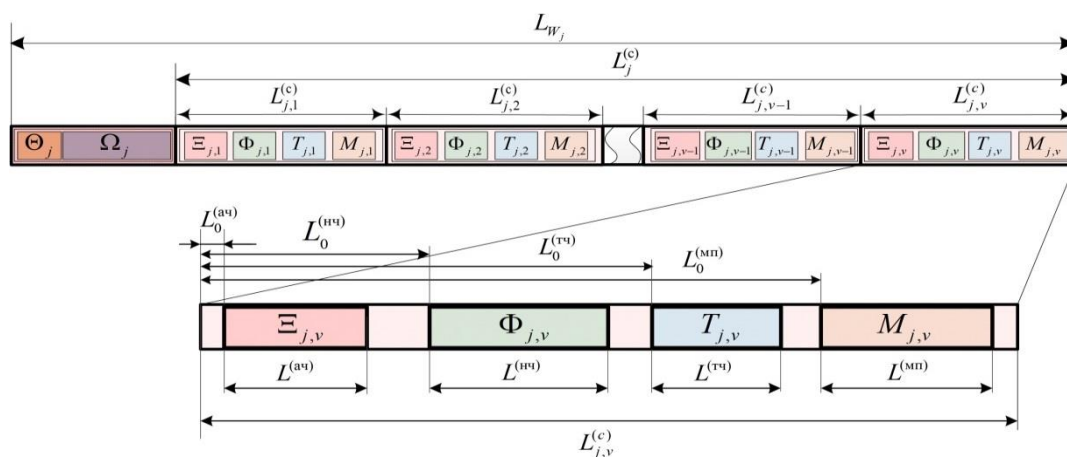


Рис. 11. Структура ПБД канала управления.

Адресация АТ осуществляется по MAC-адресу терминала. Параметры сигналов АТ следуют по мере увеличения значения MAC-адреса терминала (от наименьшего к наибольшему). В СЭ «адресная часть» $\Xi_{j,v}$ указывается MAC-адрес АТ, который является уникальным и остается неизменным на всем интервале времени функционирования ССС. MAC-адрес представляет собой уникальную комбинацию длиной 48 символов. Таким образом, размер СЭ «адресная часть» $L^{(ac)}$ составляет 6 байт. Примеры представления СЭ «адресная часть» представлены на рисунках 12 и 13.

MAC-адрес АТ																					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
0	6	57	9	251	133	3	0	4	244	178	86	191	149	255	37	28	1	20	18	46	0
0	6	57	140	251	98	3	0	4	156	50	86	191	149	1	13	213	1	25	21	154	0
0	6	57	141	3	59	3	0	4	100	50	150	82	232	254	134	44	1	25	7	119	0
0	6	57	141	54	72	3	0	4	214	50	160	161	188	1	235	187	1	25	14	37	0
0	6	57	141	58	7	3	0	4	116	50	150	82	232	2	151	65	1	27	13	186	0

Рис. 12. Пример представления СЭ «адресная часть» ПБД канала управления.

Информация о значении несущей частоты передается в СЭ «несущая частота». Значение несущей частоты сигнала F_{AT} АТ передается в виде значения отстройки (в положительную или отрицательную сторону) от значения центральной частоты пула Ω_j j -го ПБД канала управления, которая передается в СЭ «центральная частота пула» в заголовке ПБД канала управления Z_j (рисунок 9 и 10).

В СЭ «несущая частота» $\Phi_{j,v} = \{\mu_{j,v}, \zeta_{j,v}\}$ передается параметр $\mu_{j,v}$, определяющий отстройку частоты, в положительную или отрицательную сторону относительно значения центральной частоты $\Omega_{j,v}$ на величину $\zeta_{j,v}$.

Значение несущей частоты F_{AT} определяется следующим выражением:

$$\begin{cases} \mu_{j,v} = a, \text{ то } F_{AT} = \Omega_{j,v} + \zeta_{j,v} \\ \mu_{j,v} = b, \text{ то } F_{AT} = \Omega_{j,v} - \zeta_{j,v} \end{cases}, \quad (11)$$

где $\mu_{j,v} = \{a, b\}$, а и b – фиксированные значения.

Значения несущей частоты сигналов АТ могут достигать значений нескольких десятков ГГц. При этом в СЭ «несущая частота» отсутствует необходимость передавать номинал несущей частоты сигнала с точностью до 1 Гц, так как известна центральная частота пула несущих частот. Модуляционная скорость сигналов АТ может принимать значения от 30 кбод/с до 20 Мбод/с, а ширина полосы сигналов соответственно принимать значения от сотен килогерц до нескольких мегагерц. Таким образом, несущая частота АТ может принимать значения в пределах нескольких мегагерц относительно центральной частоты пула несущих частот.

Размер СЭ «несущая частота» варьируется в пределах:

$$L^{(нч)} \in \{I_0^{(нч)}, \dots, I_{\max}^{(нч)}\}. \quad (12)$$

Например, в системе «Newtec», для кодирования возможных значений несущей частоты указанных диапазонов частот необходимо от 2 до 3 байт. Таким образом, размер СЭ «несущая частота» варьируется в пределах от 9 до 24 бит:

$$L^{(нч)} \in \{9, \dots, 24\}. \quad (13)$$

Значение величины параметра $\mu_{j,v}$ передается в двоичном виде в СЭ размером от 1 до 4 бит, а значение величины отстройки $\zeta_{j,v}$ размером от 8 до 20 бит:

$$L^{(\mu)} \in \{1, \dots, 4\},$$

$$L^{(\zeta)} \in \{8, \dots, 20\}.$$

Для получения данных о номинале несущей частоты сигнала АТ по линии «КА – АТ» необходимо производить перерасчет с учетом выражения (11). Пример представления СЭ «несущая частота» представлен на рисунке 13.

В СЭ «тактовая частота» в двоичном виде указывается значение тактовой частоты сигнала отдельного АТ. Порядок отображения значений тактовой частоты в двоичном коде можно представить как упорядоченное множество:

$$\langle t_{1,v}, t_{2,v}, \dots, t_{l,v}, \dots, t_{L^{(тч)},v} \rangle = \Upsilon^{(тч)}(T_v), \quad t_{l,v} \in \{0,1\}, \quad (14)$$

где T_v – значение требуемой тактовой частоты сигнала T_v v - сегмента

ПБД канала управления;

$t_{l,v}$ – l -й двоичный символ СЭ «тактовая частота» для значения параметра T_v v - сегмента ПБД канала управления;

$\Upsilon^{(тч)}$ – функция преобразования двоичной последовательности в значение СЭ «тактовая частота»;

$L^{(тч)}$ – число двоичных символов СЭ «тактовая частота».

Размер СЭ «несущая частота» варьируется в пределах:

$$L^{(нч)} \in \{l_0^{(нч)}, \dots, l_{\max}^{(нч)}\} \quad (15)$$

Например, в рамках модели формирования канала управления системы «Newtec» размер СЭ «тактовой частоты» варьируется в пределах от 5 до 16 бит. Для получения значения тактовой частоты сигнала АТ необходимо полученное из (14) значение тактовой частоты T_v умножить на фиксированный минимальный размер ширины полосы сигнала АТ, используемый в данной ССС. При минимальном значении модуляционной скорости порядка 30 кбод/с в зависимости от применяемого вида модуляции ширина полосы сигнала может составлять порядка 30830 Гц.

Пример представления СЭ «тактовая частота» представлена на рисунке 13. Так как ширина полосы сигналов АТ не превышает нескольких мегагерц, для кодирования тактовой частоты сигнала достаточно одного байта [3]. Таким образом, размер СЭ «тактовая частота» на примере системы «Newtec» варьируется в пределах от 1 до 8 бит.

$$L^{(TЧ)} \in \{1, \dots, 8\}$$

В современных ССС применяются различные совокупности видов модуляции и помехоустойчивого кодирования сигналов АТ. Для реализации компромисса между излучаемой мощностью и спектральной эффективностью сигналов АТ применяется расширенный набор скоростей помехоустойчивого кодирования при различных видах модуляции. Перечень используемых совокупностей видов модуляции и помехоустойчивого кодирования сигналов АТ ССС ограничен, может включать в себя до нескольких десятков типов и выбирается исходя их загрузки системы связи и влияния помех на радиоканал [1].

Значения идентификатора применяемого вида модуляции и типа помехоустойчивого кода передается в СЭ «вид модуляции и п/у кода» и принимает одно из табличных значений используемых видов модуляции и кодирования. Таким образом, для кодирования идентификатора достаточно 1 байта.

В рамках модели формирования канала управления на примере системы «Newtec», для кодирования возможных значений СЭ «вид модуляции и п/у кода» требуется от 1 до 8 бит:

$$L^{(МП)} \in \{1, \dots, 8\}. \quad (16)$$

Пример представления СЭ «вид модуляции и п/у кодирования» представлена на рисунке 13.

17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
00000000	01100000	10011100	10010000	10101110	10110101	11000000	00000000	00101000	10110110	00000000	00000000	00000000	00000000	11001111	10101110	00111000	10000000	00101000	01100000	01100011	00000000
00000000	01100000	10011100	10010000	10101110	10110101	11000000	00000000	00101000	10110110	01001100	10101000	11101110	10000000	11001111	10000001	10001101	10000000	00101000	01100000	01100011	00000000
00000000	01100000	10011100	10010000	10101110	10110101	11000000	00000000	00101000	10110110	01001100	11010001	00010100	10110100	11001111	10101110	00111000	10000000	00101000	01100000	01100011	00000000
00000000	01100000	10011100	10010000	10101110	10110101	11000000	00000000	00101000	10110110	01001100	01101011	11111101	10101001	11001111	10101110	00111000	10000000	00101000	01100000	01100011	00000000
00000000	01100000	10011100	10010000	10101110	10110101	11000000	00000000	00101000	10110110	01001100	00110111	10011100	00100100	11001111	10000001	00001101	10000000	00101000	01100000	01100011	00000000
00000000	01100000	10011100	10010000	10101110	10110101	11000000	00000000	00101000	10110110	11001100	01101000	01001010	00010111	11001111	10101110	00111000	10000000	00101000	01100000	01100011	00000000
00000000	01100000	10011100	10010000	10101110	10110101	11000000	00000000	00101000	10110110	11001100	11011100	00001101	00010101	11001111	10000001	10001101	10000000	00101000	01100000	01100011	00000000

Рис. 13. Пример двоичного представления СЭ сегмента ПБД УС канала управления.

Таким образом, обоснован состав и структура ПБД управляющих сообщений канала управления динамическим изменением параметров сигналов АТ. Основными СЭ ПБД канала являются СЭ «идентификатор длины», «центральная частота», «адресная часть», «несущая частота», «тактовая частота», «вид модуляции и п/у кода» позволяющими получить информацию о значении центральной частоты пула несущих частот сигналов АТ, несущей частоты, тактовой частоты, вида модуляции и п/у кодирования сигналов АТ. Значения параметров, передаваемых в данных структурных элементах необходимы для контроля сигналов ССС с динамическим изменением параметров сигналов АТ.

2. Вариативность построения структурных элементов управляющих сообщений протокольных блоков данных канала управления

В силу отсутствия стандартизованного протокола, производители оборудования разрабатывают свои собственные протоколы передачи ПБД УС канала управления. В связи с этим возможно существование множества различных альтернатив структуры ПБД управляющих сообщений канала управления. Производитель оборудования реализует одну из них, при этом описание протокола формирования ПБД в открытых источниках не публикуется.

Несмотря на непостоянство размеров и расположения СЭ в ПБД управляющих сообщений канала управления, формат заголовочной части ПБД и его сегментов определен протоколом передачи данных и одинаков для всех ПБД данного канала управления.

Поэтому СЭ «идентификатор длины», «центральная частота», «адресная часть», «несущая частота», «тактовая частота» и «вид модуляции и пу/кодирования» образуют группу, в которой их взаиморасположение инвариантно для любого сегмента ПБД (рисунок 14).

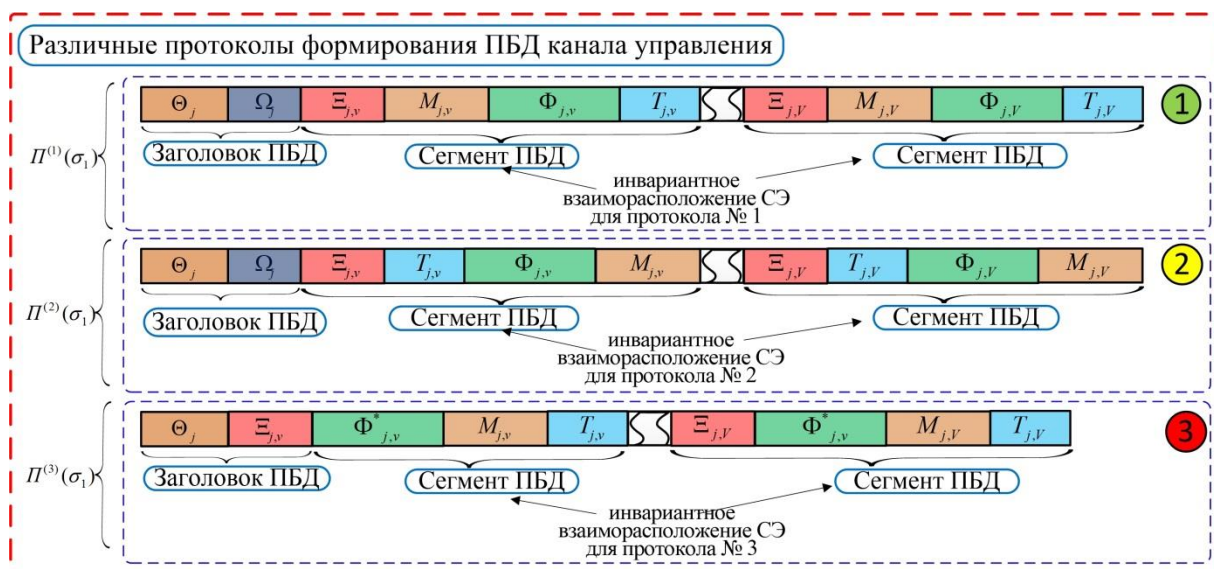


Рис. 14. Примеры инвариантного взаиморасположения структурных элементов в сегментах ПБД для трех разных протоколов формирования.

В силу того, что диапазон возможных значений параметров структурных элементов ограничен и они могут принимать дискретные значения, существует счетное число альтернатив взаиморасположения и параметров СЭ ПБД. Производитель телекоммуникационного оборудования может разработать протокол формирования ПБД канала управления, в котором, структура ПБД будет одной из множества $\{П\}_{N_{\text{возм}}}$ всех возможных альтернатив структуры (рисунок 14 и 15). При этом производитель оборудования должен учитывать следующие условия:

- СЭ ПБД не обязательно следуют непосредственно друг за другом, между ними могут располагаться другие СЭ, не рассматриваемые в модели или «поля-заполнители»;
- ПБД не обязательно содержат все СЭ, например, СЭ «несущая частота» и СЭ «центральная частота» могут быть объединены и передавать значение несущей частоты сигнала АТ в явном виде;

– для каждого варианта взаиморасположения СЭ ПБД можно спроектировать множество альтернатив размеров СЭ и их размещения в ПБД.

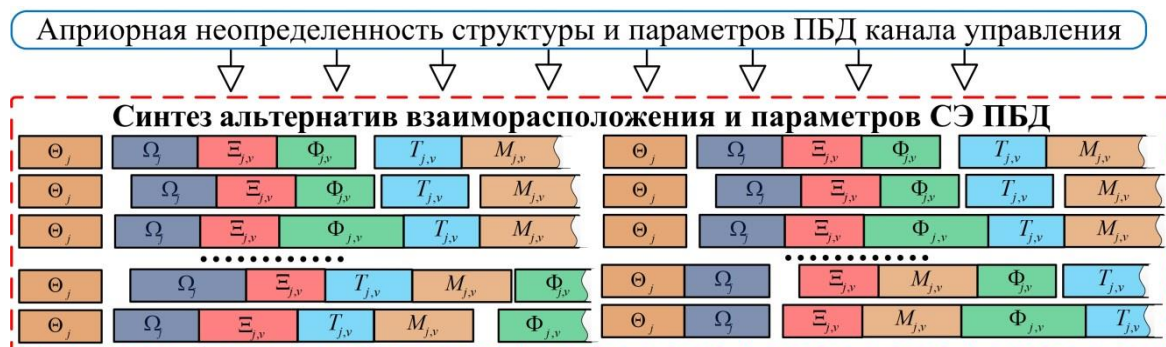


Рис. 15. Вариативность построения структурных элементов управляющих сообщений.

Оценить число $N_{\text{вар}}$ возможных альтернатив структуры одного сегмента

протокольных блоков данных управляющих сообщений канала управления, одну из которых может реализовать конкретный протокол, можно с помощью выражения (17):

$$N_{\text{вар}} = A_{N(C)}^{N^*(C)} \cdot \sum_{l_{\xi}^{\Xi} = L_{\min}^{\Xi}}^{L_{\max}^{\Xi}} (L_{\max}^{\Xi} - l_{\xi} + 1) \cdot \sum_{l_{\phi}^{\Phi} = L_{\min}^{\Phi}}^{L_{\max}^{\Phi}} (L_{\max}^{\Phi} - l_{\phi} + 1) \cdot \sum_{l_t^T = L_{\min}^T}^{L_{\max}^T} (L_{\max}^T - l_t + 1) \sum_{l_m^M = L_{\min}^M}^{L_{\max}^M} (L_{\max}^M - l_m + 1), \quad (17)$$

$$N_{\text{вар}} = 4! \cdot \sum_{l_{\xi}^{\Xi} = 8}^{L_{\max}^{\Xi} = 48} (L_{\max}^{\Xi} - l_{\xi} + 1) \cdot \sum_{l_{\phi}^{\Phi} = 9}^{L_{\max}^{\Phi} = 24} (L_{\max}^{\Phi} - l_{\phi} + 1) \cdot \sum_{l_t^T = 1}^{L_{\max}^T = 16} (L_{\max}^T - l_t + 1) \sum_{l_m^M = 1}^{L_{\max}^M = 16} (L_{\max}^M - l_m + 1), \quad (18)$$

$$N_{\text{вар}} \approx 4 \cdot 10^6, \quad (19)$$

где $N_{\text{вар}}$ – количество альтернатив структуры протокольных блоков данных УС канала управления;

$L_{\max}^{\Xi}, L_{\min}^{\Xi}$ – максимально и минимально возможные длины СЭ «адресная часть» ПБД, бит;

$L_{\max}^{\Phi}, L_{\min}^{\Phi}$ – максимально и минимально возможные длины СЭ «несущая частота», бит;

L_{\max}^T, L_{\min}^T – максимально и минимально возможные длины СЭ «тактовая частота», бит;

L_{\max}^M, L_{\min}^M – максимально и минимально возможные длины СЭ «вид модуляции и кодирования», бит;

- l_{ξ} – возможное значение размера СЭ «адресная часть» ПБД, бит;
- l_{ϕ} – возможное значение размера СЭ «несущая частота» ПБД, бит;
- l_t – возможное значение размера СЭ «тактовая частота» ПБД, бит;
- l_m – возможное значение размера СЭ «вид модуляции и кодирования» ПБД, бит;
- $N(C)$ – количество возможных СЭ в сегменте ПБД УС канала управления;
- $N^*(C)$ – количество СЭ в сегменте ПБД УС канала управления.

Например, с помощью выражения (17 и 18) можно оценить, что при условии, что размер одного сегмента ПБД канала управления не превышает 13 байт, число различных альтернатив взаиморасположения СЭ и значений размеров их СЭ составляет примерно $4 \cdot 10^6$. Таким образом, решить задачу идентификации структуры протокольных блоков данных управляющих сообщений канала управления методом перебора в приемлемые сроки, не представляется возможным.

Заключение

Разработанная модель формирования ПБД управляющих сообщений канала управления динамическим изменением параметров сигналов абонентских терминалов позволяет описывать структуру ПБД и особенности формирования структурных элементов ПБД УС. В модели выделены СЭ ПБД «идентификатор длины», «центральная частота», «адресная часть», «несущая частота», «тактовая частота», «вид модуляции и п/у кодирования», содержащие информацию о параметрах сигналов АТ и необходимых для идентификации ПБД. На основе разработанной модели представлен пример ПБД УС канала управления системы связи «Newtec». Модель учитывает вариативность структуры ПБД УС, позволяет оценить число возможных альтернатив структуры одного сегмента ПБД УС канала управления. Полученные с использованием модели данные о структуре ПБД УС позволяют разработать информативные признаки идентификации ПБД

УС канала управления в групповом цифровом потоке центральной земной станции ССС с динамическим изменением параметров сигналов АТ.

Литература

1. Кукк К.И. Спутниковая связь: прошлое, настоящее, будущее. – М.: Горячая линия – Телеком, 2016. – 256 с.
2. Михайлов Р.Л. Описательные модели систем спутниковой связи как космического эшелона телекоммуникационных систем специального назначения. Монография. – СПб.: Научное издание, 2019. – 150 с.
3. Сомов А.М. Спутниковые системы связи: Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011 – 244 с.
4. Новиков Е.А., Динамическое резервирование радиоресурса в сетях спутниковой связи при передаче самоподобного трафика / Косяков Е.Н., Павлов А.Р // Спутниковые системы связи и вещания. – 2014. – № 2. – С. 49 – 60.
5. Клецков Д.А. Самоподобие служебных пакетов канала управления спутниковых систем связи с многостанционным доступом и временным разделением абонентов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2014.– Вып. 644. – С.51 – 61.
6. Новиков Е. А., Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении // Информационно-управляющие системы.– 2014.– № 2. – С. 79 – 86.
7. Ковальский А. А. Организация адаптивного мультиплексирования трафика мультисервисных сетей в каналообразующей аппаратуре земных станций спутниковой связи с учетом изменяющейся помеховой обстановки // Системы управления, связи и безопасности. –2017. – № 1. – С. 175 – 212.

8. Абазина Е.С. Методика планирования и распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи / Абазина Е.С., Зиннуров С.Х., Лукинов К.Н., Федосеев В.Е. – Текст: электронный // Вопросы оборонной техники – 2015. – № 1-2. – с.9 – 16.
9. Клецков Д.А. Применение показателя Херста для поиска служебных пакетов канала управления в групповых сигналах спутниковых систем связи с многостанционным доступом и временным разделением абонентов/ Еремеев И.Ю. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015.– Вып. 647. – С. 48 – 57.
10. Никитин Г. В. Метод идентификации структуры протокольных блоков с мультиплексированием речевых данных на прикладном уровне / А. В. Шишкалов, С. С. Семенюк, А. В. Кудрин // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2023. – № 1-2(175-176). – С. 27-34.
11. Шишкалов А.В., Никитин Г.В., Кудрин А.В. Информативный признак определения категории передаваемых данных в высокоскоростных сетях передачи информации. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №11.
12. Mogul J. C., Deering S. E. RFC1191 : Path MTU discovery/ – 1990.

Для цитирования:

Кудрин А.В., Никитин Г.В, Шишкалов А.В. Модель формирования протокольных блоков данных управляющих сообщений канала управления динамическим изменением параметров сигналов абонентских терминалов. // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.10.6>