

УДК 519.724

## ПОДХОД К РАСЧЕТУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВЫИГРЫША ПРИ ПОСТАНОВКЕ ПОМЕХ СИСТЕМЕ ЦИКЛОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ СПУТНИКОВЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

С. А. Луценко

Военная академия связи имени С.М. Буденного  
194064, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий проспект, д. 3

Статья поступила в редакцию 15 марта 2019 г.

**Аннотация.** В современном мире все возрастающую роль играют цифровые системы передачи, использующие в зависимости от решаемых задач разнообразные линии передачи: волоконно-оптические, радиорелейные, тропосферные, спутниковые и т.д. Важной составной частью цифровой системы передачи, определяющим во многом помехоустойчивость связи и качество цифровых каналов, предоставляемых пользователям, является система синхронизации. Являясь одним из основных элементов, обеспечивающих устойчивое взаимодействие между передающей и приемной сторонами в спутниковых радиолиниях, система синхронизации наиболее уязвима перед воздействием различного рода помеховых сигналов. Целью данной работы является формулирование подхода к расчету энергетического выигрыша при постановке помех системе цикловой синхронизации спутниковых линий связи. Данная статья будет интересна специалистам, занимающимся вопросами организации спутниковых каналов связи.

**Ключевые слова:** преднамеренная помеха, цикловая синхронизация, вероятность ошибки, энергетический выигрыш, синхрогруппа.

**Abstract.** In the modern world, digital transmission systems play an ever-increasing role, using, depending on the problem to be solved, various transmission lines: fiber-optic, radio-relay, tropospheric, satellite, etc. An important part of the digital transmission system, which largely determines the noise immunity of communications and the quality of digital channels provided to users, is the synchronization system. Being one of the main elements ensuring a stable interaction

between the transmitting and receiving sides in satellite radio links, the synchronization system is most vulnerable to the effects of various kinds of interfering signals. The purpose of this work is to formulate an approach to the calculation of the energy gain in the formulation of interference to the frame alignment system of satellite communication lines. This article will be of interest to professionals involved in the provision of sustainable satellite communication channels.

**Key words:** jamming, frame alignment, error probability, energy gain, sync group.

## 1. Введение

Развитие науки и ускорение технического прогресса невозможны без совершенствования средств связи, систем сбора, передачи и обработки информации. Интенсивное развитие новых информационных технологий в последние годы привело к бурному развитию микропроцессорной техники, которая стимулировала развитие цифровых методов передачи информации. Самые современные системы передачи ориентированы на то, что необходимо сделать так, чтобы все операции по обработке цифровых сигналов выполнялись синхронно и последовательно. Независимо от вида передаваемых сообщений применение дискретных (цифровых) сигналов для их передачи предполагает наличие синхронизма между передатчиком и приемником. При этом синхронизм обеспечивается как по элементам сигнала (тактовая синхронизация), так и по различным блокам (группам) этих элементов (цикловая синхронизация) [1,2,4].

Тактовая синхронизация обеспечивается за счет измерения интервалов между фронтами элементов сигнала различных позиций или за счет априорного знания символьной скорости. В спутниковых системах связи символьная скорость, как правило, с требуемой точностью известна на приемной стороне канала связи. Подстройка же приемной аппаратуры осуществляется по фазе тактовой синхронизации.

Создание преднамеренных помех, направленных исключительно на срыв функционирования системы тактовой синхронизации, весьма затруднено. В процессе функционирования синхронной системы связи навязывание ей фазы тактовой синхронизации мощной помехи возможно только в том случае, если она не имеет контроля качества сигнала по принимаемой информации. В противном случае на время действия помехи система тактовой автоподстройки может отключаться.

Поскольку при передаче информации по линиям связи не выделяются специальные элементы для поддержания тактовой синхронизации (за исключением моментов вхождения в связь), создание уводящей по фазе или скорости тактовой синхронизации помехи означает эффективное подавление всех передаваемых символов и сводится к традиционной подоптимальной помехе [3].

## **2. Эффективность воздействия помех на элементы цикловой синхронизации**

Анализ последних статей в данной предметной области [5-9] показал, что знание и учет структурно-временных параметров спутниковых сигналов (в частности, ФМШПС (фазоманипулированных широкополосных сигналов)) позволит получить большую эффективность постановки помеховых сигналов. Стоит предположить, что максимальный энергетический и временной выигрыш можно получить, используя при создании помех особенности цикловой синхронизации.

Как известно, для осуществления процесса цикловой синхронизации необходимо иметь сигналы, несущие информацию о фазе передаваемого блока. Эту информацию, в принципе, можно извлекать из самого сообщения, если оно закодировано с избыточностью, но чаще для реализации цикловой синхронизации в «прозрачных» каналах связи на современных линиях для этой цели используются специально выделенные символы.

Специальные символы цикловой синхронизации передаются в известных позициях синхронизируемого блока, позволяя тем самым фиксировать его

начало и конец. Эти символы могут представлять собой как сосредоточенную, так и распределенную синхрогруппу. Пример использования сосредоточенной синхрокомбинации при передаче спутниковых сигналов по стандарту CCSDS представлен на рис. 1.

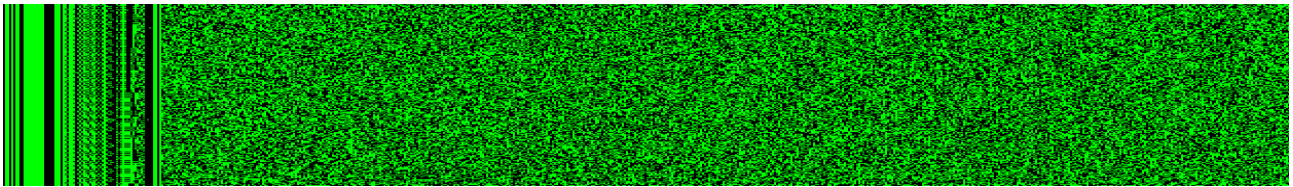


Рис. 1. Пример использования сосредоточенной синхрокомбинации при передаче спутниковых сигналов по стандарту CCSDS (32 бита в начале кадра).

В принципе, при высокой степени тактовой синхронизации достаточно в начале передачи информации послать сигнал пуска, относительно которого и отсчитывать нужные блоки информации (кодовые комбинации, циклы, сверхциклы и др.).

Этот способ получил распространение для передачи только коротких сообщений. При непрерывной передаче сообщений или при передаче большого объема информации способ одноразовой передачи сигналов синхροинформации, как правило, не применяют. Обусловлено это реальной возможностью появления вставок и выпадений символов в системе тактовой синхронизации, что приводит к потере оставшейся части передаваемого сообщения или необходимости организации нового вхождения в связь.

В связи с этим в большинстве современных синхронных систем связи осуществляется непрерывный контроль за состоянием системы синхронизации, а синхросигналы передаются в каждом цикле передачи. При этом в большинстве систем передачи дискретной информации синхронизация по циклам строится по принципу автоматической самосинхронизации.

Прицельное воздействие помехами на канал цикловой синхронизации возможно в системах связи с выделенными элементами синхронизации. При этом целью воздействия является на первом этапе достижение срыва синхронизма в канале связи и недопущение в, последующем.

Рассмотрим первый этап, т. е. условия выхода приемной аппаратуры из синхронизма. На современных линиях связи, как правило, критерием выхода системы из синхронизма является появление  $D$  ошибок синхронизации подряд (реже  $D$  ошибок на заданном числе циклов). Величина  $D$  характеризует инерционность системы цикловой синхронизации и показывает, какое минимальное число синхрогрупп необходимо гарантированно исказить для достижения требуемого эффекта.

Единицей ошибкой синхронизации при этом считается искажение в принимаемой синхрогруппе, состоящей из  $n_{\text{сг}}$  разрядов, более  $d$  символов. Таким образом, если допустимым числом искаженно принятых разрядов является  $d$  из  $n_{\text{сг}}$ , а вероятность ошибочного приема каждого символа определяется величиной  $p_{\text{э}}$ , то вероятность единичной ошибки синхронизации равна вероятности ошибочного приема синхрогруппы  $p_{\text{сг}}$  [3]

$$p_{\text{сг}} = 1 - \sum_{i=0}^d C_{n_{\text{сг}}}^i p_{\text{э}}^i (1 - p_{\text{э}})^{n_{\text{сг}} - i} \quad (1)$$

Значение  $p_{\text{э}}$  определяется условиями передачи спутниковых сигналов, включающими вероятность частотно-временного совпадения элементов синхронизации и помехи, помехоустойчивость способа передачи информации, отношение сигнал/шум в канале, структуру и мощность преднамеренной помехи. Являясь событием случайным, ошибочный прием элемента сигнала приводит к другому случайному событию – ошибочному приему синхрогруппы. Событие сбоя синхронизма является также случайным, поскольку наступает после свершения  $D$  раз подряд другого случайного события. Следовательно, можно говорить только о средней ожидаемой величине удержания синхронизма  $\overline{N}_{\text{с}}$  при воздействии помех, приводящих к вероятности ошибочного приема синхрогруппы  $p_{\text{сг}}$ . Величина  $\overline{N}_{\text{с}}$  означает математическое ожидание числа принятых циклов до выхода системы из синхронизма.

На основе теории рекуррентных событий удается получить выражение для величины  $\overline{N}_c$  :

$$\overline{N}_c = \frac{p_{cr}^{-D} - 1}{1 - p_{cr}} \quad (2)$$

Подставляя сюда выражение (1), можно получить непосредственную связь  $\overline{N}_c$  с вероятностью  $p_{cr}$ .

На рис. 2 представлены графики зависимости  $\overline{N}_c$  от  $p_{cr}$  для различных значений  $D$ . Как и следовало ожидать, при гарантированном подавлении синхрогруппы ( $p_{cr} = 1$ ) число циклов, после которого произойдет выход из синхронизма, становился равным  $D$ . В этом нетрудно убедиться, раскрыв неопределенность вида 0/0 в выражении (2).

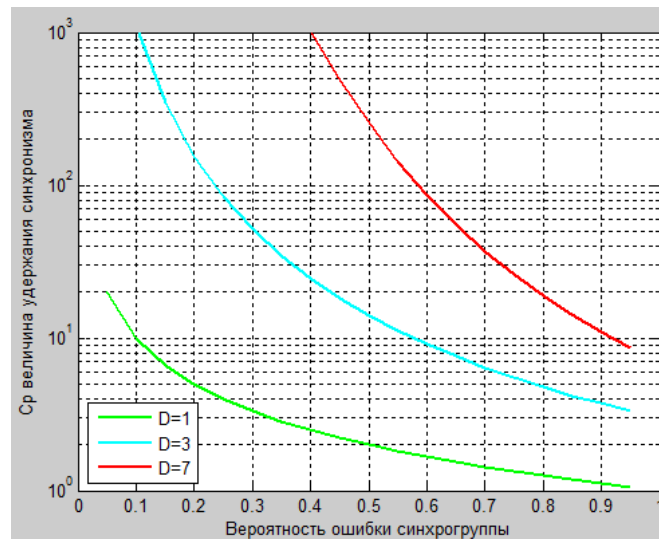


Рис. 2. Графики зависимости среднего времени удержания синхронизма от вероятности ошибки синхрогруппы.

Если длительность цикла в передаче  $T_{ц}$  известна, то среднее время выхода из синхронизма системы связи  $\overline{T}_c$  на основании (2) определяется формулой

$$\overline{T}_c = \overline{N}_c T_{ц} = \frac{p_{cr}^{-D} - 1}{1 - p_{cr}} T_{ц}. \quad (3)$$

При известной скорости манипуляции  $V_c$  и числе элементов в цикле передачи  $N_{ц}$

$$\overline{T}_c = \frac{(p_{\text{ср}}^{-D} - 1)N_{\text{ц}}}{(1 - p_{\text{ср}})B_c}. \quad (4)$$

Данные выражения позволяют оценить требуемое среднее время подавления системы цикловой синхронизации линии связи до ее срыва. После выхода из синхронизма система цикловой синхронизации переходит в режим поиска. Время, за которое будет восстановлен синхронизм, зависит от таких факторов, как число элементов в цикле передачи  $N_{\text{ц}}$ , символьная скорость  $B_c$ , длина  $n_{\text{ср}}$  и структура синхрогруппы. Так, в худшем для постановки помехи случае, когда синхрогруппа представляет собой  $n_{\text{ср}}$  единиц или нулей, время вхождения в синхронизм оказывается минимальным и ориентировочно определяется выражением

$$\overline{T}_B \approx \left[ \frac{2^{n_{\text{ср}}-1}(N_{\text{ц}} - 1)}{(2^{n_{\text{ср}}} - 1)^2} + 1 \right] \frac{N_{\text{ц}}}{B}. \quad (5)$$

Время восстановления цикловой синхронизации является случайной величиной даже при отсутствии помех в канале связи. Это связано с возможностью ложной синхронизации системы в силу случайного характера передаваемого сигнала. На современных линиях связи в качестве синхрогруппы часто используются такие кодовые комбинации, которые не входят в число разрешенных для передачи информации и не могут быть получены при любой последовательности передачи этих комбинаций. В этом случае время восстановления синхронизма будет равно циклу данной передачи.

В случае же наличия помех время восстановления синхронизма  $\overline{T}_B'$  определяется дополнительно вероятностью ошибочного приема синхрогруппы  $p_{\text{ср}}$ , вычисляемой из (1), и при известной величине  $\overline{T}_B$  может быть найдено из выражения

$$\overline{T}_B' = \frac{\overline{T}_B}{1 - p_{\text{ср}}} \quad (6)$$

Для худшего с позиций РЭП случая, когда  $\bar{T}_B = \frac{N_{\text{ц}}}{B}$ , среднее время восстановления синхронизма

$$\bar{T}_B' = \frac{N_{\text{ц}}}{(1 - p_{\text{сг}})B}. \quad (7)$$

Таким образом при воздействии на синхрогруппу преднамеренной помехой, обеспечивающей вероятность ее ошибочного приема  $p_{\text{сг}}$  в линии связи, в среднем будет иметь место периодический процесс, состоящий в том, что в течение времени  $\bar{T}_c$  [см. (4)] происходит удержание синхронизма, при котором будем считать вероятность правильного приема информации, содержащийся в цикле передачи, близкой к единице (т. е. во много раз больше требуемой вероятности приема при создании помех). По истечении времени удержания происходит срыв синхронизации в среднем на время ее восстановления  $\bar{T}_B'$  [см. (7)]. Если произошло нарушение цикловой синхронизации, то все информационные элементы, переданные до ее восстановления, будут приняты неверно. Следовательно, можно утверждать, что в любой момент времени вероятность нахождения системы связи в состоянии срыва синхронизации равна

$$p_{\text{сг}} = \frac{\bar{T}_B'}{\bar{T}_c + \bar{T}_B'}. \quad (8)$$

Учитывая введенные ранее соотношения (6) и (9), получим выражение

$$p_{\text{сг}} = p_{\text{сг}}^D. \quad (9)$$

Величина  $p_{\text{сг}}$  равна вероятности того, что синхрогруппа будет принята  $D$  подряд раз.

Поскольку срыв синхронизации приводит к тому, что в течение времени  $\bar{T}_B'$  будет отсутствовать прием сигнала, величина  $p_{\text{сг}}$  эквивалентна вероятности неправильного приема всех кодовых комбинаций на этом временном



интервале. Если в цикле передачи содержится  $N_{\text{кц}}$  кодовых комбинаций, то длительность каждой из них будет равна

$$\Delta t_{\text{кк}} = \frac{N_{\text{ц}}}{BN_{\text{кц}}}, \quad (10)$$

а число кодовых комбинаций, принятых с вероятностью  $p_{\text{сс}}$

$$N_{\text{кк}} = \frac{\overline{T}_{\text{в}}}{\Delta t_{\text{кк}}} = \frac{N_{\text{кц}}}{1 - p_{\text{сг}}}. \quad (11)$$

Вероятность неправильного приема  $N_{\text{кк}}$  кодовых комбинаций эквивалентна соотношению

$$p_{\text{сс}} = p_{\text{кк}}^{N_{\text{кк}}}, \quad (12)$$

где  $p_{\text{кк}}$  – вероятность неправильного приема единичной кодовой комбинации.

Учитывая (11) и (13), нетрудно найти соотношение между вероятностью неправильного приема синхрогруппы  $p_{\text{сг}}$  и вероятностью ошибочного приема кодовой комбинации  $p_{\text{кк}}$ :

$$p_{\text{кк}} = \exp \left[ \frac{(1 - p_{\text{сг}})D}{N_{\text{кц}}} \ln p_{\text{сг}} \right]. \quad (13)$$

На рис. 3 представлены графики зависимости  $p_{\text{кк}}$  от  $p_{\text{сг}}$  при различных значениях  $D/N_{\text{кц}}$ . Для каналов спутниковой связи эта величина составляет, как правило, сотые доли. При этом, как видно из графиков, даже небольшие значения  $p_{\text{сг}}$  приводят к существенным ошибкам при приеме кодовых комбинаций. Так, если принять во внимание, что помехоустойчивость синхрогруппы может оказаться выше помехоустойчивости информационной кодовой комбинации, метод прицельного подавления синхрогрупп позволяет получать существенный энергетический выигрыш для многоканальных линий связи с временным уплотнением. Кроме того, помеха по сравнению с непрерывной обладает повышенной скрытностью, а также возникает

принципиальная возможность квазиодновременного подавления нескольких цифровых каналов связи.

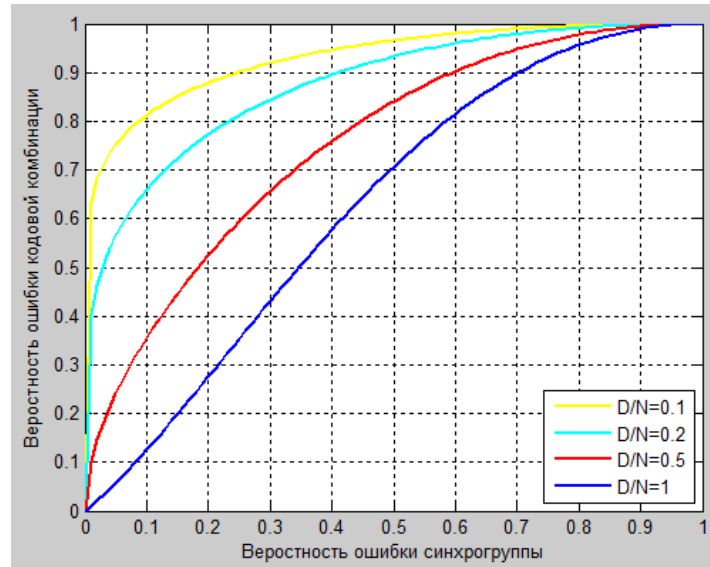


Рис. 3. Графики зависимости вероятности ошибки кодовой комбинации от вероятности ошибки синхрогруппы.

### 3. Оценка энергетического выигрыша при воздействии помех на элементы цикловой синхронизации

Под энергетическим выигрышем будем понимать отношение энергии  $E_n$  непрерывной помехи, приводящей к требуемому значению вероятности ошибочного приема кодовой комбинации  $p_{кк}$ , к энергии помехи, воздействующей только на синхроэлементы  $E_d$  и обеспечивающей то же значение  $p_{кк}$ . При этом согласно [3] вероятность ошибочного приема кодовой комбинации вычисляется как

$$p_{кк} = 1 - \sum_{i=0}^{N_{доп}} C_n^i p_3^i (1 - p_3)^{n-i}, \quad (14)$$

где  $N_{доп}$  – допустимое число ошибок (неправильно принятых символов), появление которых на  $n$  подряд переданных символах позволяет восстановить без искажений все переданные знаки. Величина  $N_{доп}$  является исправляющей способностью кода и определяется через минимальное кодовое расстояние.

Получение аналитического выражения, определяющего в общем виде отношение  $E_n/E_d$ , связано с трудностями выражения обратных функций из

степенных рядов типа (13), (14). В связи с этим наиболее приемлемыми являются графический или итеративный методы нахождения требуемых величин.

Методика расчета энергетического выигрыша состоит в следующем.

1. По требуемому значению  $p_{\text{кк}}$  с учетом величины  $D$  и числа каналов (кодовых комбинаций в цикле передаче)  $N_{\text{кц}}$  графически или итеративным методом в соответствии с (13) находится соответствующее значение  $p_{\text{сг}}$ .

2. Учитывая способ кодирования (исправляющую способность и разрядность кода  $N_{\text{доп}}$ ) в соответствии с выражением (14) определяем требуемую величину вероятности ошибочного приема элемента сигнала  $p_{\text{э}}$  для обеспечения заданной величины  $p_{\text{кк}}$ . Здесь также целесообразны графический или итеративный методы.

3. Величина  $p_{\text{э}}$  при фазовой модуляции однозначно определяет требуемый коэффициент подавления кодовых комбинаций  $K_{\text{кк}}$  в соответствии с формулой [3]

$$p_{\text{э}} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - F \left[ \sqrt{2h_c^2 (1 + Kg_r)} \right] \right\}, \quad (15)$$

где  $F(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$  – табулированная функция Крампа,  $h_c^2$  – отношение

энергии элемента сигнала к спектральной плотности шума,  $K$  – отношение мощности преднамеренной помехи к мощности сигнала на входе приемника,  $g_r$  – коэффициент близости преднамеренной помехи и  $r$ -й позиции сигнала на интервале времени  $0 \dots T$ . Для случая когерентного приема пределы изменения величины  $g_r$  составляют от -1 до 1.

4. Нормированная к мощности сигнала энергия помехи, требуемая для подавления всех кодовых комбинаций с вероятностью  $p_{\text{кк}}$  в течение одного цикла передачи

$$E_{\text{н}} = K_{\text{кк}} N_{\text{кц}} \Delta t_{\text{кк}}. \quad (16)$$

5. По найденной величине  $p_{\text{сг}}$  с учетом особенностей построения синхрогруппы  $(d, n_{\text{сг}})$ , используя выражение (1), известными методами находим величину требуемой вероятности ошибки приема элемента синхрогруппы  $p_{\text{э}}$ .

6. Аналогично ранее использованному методу для нового значения  $p_{\text{э}}$  находим коэффициент подавления  $K_{\text{сг}}$

7. Поскольку на цикле передачи такая помеха должна действовать только во время существования синхрогруппы, ее приведенная к мощности сигнала энергия будет составлять в общем случае:

$$E_{\text{д}} = K_{\text{сг}} \Delta t_{\text{сг}}. \quad (17)$$

Здесь  $\Delta t_{\text{сг}}$  – длительность синхрогруппы.

В современных многоканальных передачах с временным уплотнением, как правило, под синхронизацию отводится один из каналов, т. е.  $n_{\text{сг}} = n$ , а, следовательно, время действия помехи становится равным длительности кодовой комбинации  $\Delta t_{\text{кк}}$ . Нормированная энергия помехи в этом случае

$$E_{\text{д}} = K_{\text{сг}} \Delta t_{\text{кк}}. \quad (18)$$

8. Энергетический выигрыш применения прицельной по синхрокомбинации помехи находится из отношения

$$\frac{E_{\text{н}}}{E_{\text{д}}} = \frac{K_{\text{кк}} N_{\text{кк}}}{K_{\text{сг}}} \quad (19)$$

или в общем виде, когда длительность синхрогруппы  $\Delta t_{\text{сг}}$  не равна длительности временного канала  $\Delta t_{\text{кк}}$ , энергетический выигрыш определяется следующим образом:

$$\frac{E_{\text{н}}}{E_{\text{д}}} = \frac{K_{\text{кк}} T_{\text{ц}}}{K_{\text{сг}} \Delta t_{\text{сг}}} \quad (20)$$

Здесь  $T_{\text{ц}}$  – длительность цикла передачи.

Изложенная выше методика может быть применена и для передач, в которых в качестве элементов цикловой синхронизации выступает единичный маркерный импульс, обычно имеющий большую длительность, чем

информационный элемент. В этом случае  $p_{сг}=p_{э}$ , а величина  $\Delta t_{сг}$  равна длительности маркерного импульса.

#### 4. Заключение

В заключение статьи стоит подчеркнуть, что основной проблемой реализации метода прицельного подавления цикловых синхроэлементов является синхронизация с ними помехи, т. е. обеспечение одновременного прихода на приемный конец линии связи синхрогруппы и помехи. Такая синхронизация может быть обеспечена при наличии контроля временного совмещения помехи и сигнала, например, при подавлении спутниковых каналов связи, когда имеется энергетический доступ ко входу ретранслятора и электромагнитная доступность к его выходу относительно подавляемого канала связи. Иногда благоприятные условия для подавления синхрогрупп в цифровых потоках могут складываться на линиях связи с многократной ретрансляцией сигналов, в частности на радиорелейных и тропосферных линиях связи [10]. Дальнейшим направлением исследований видится проработка вопросов практической оценки энергетического выигрыша при постановке помех элементам цикловой синхронизации в спутниковых системах связи с прямой ретрансляцией и с обработкой сигналов на борту.

#### Литература

1. Линдсей В. Система синхронизации в связи и управлении. / Пер. англ., под ред. Ю.Н. Бакаева и М.В. Капранова, М.: Сов. радио, 1978. 600 с.
2. Дворников С.В., Духовницкий О.Г. Оценка помехозащищенности профессионального радионавигационного оборудования системы Глонасс // Информация и космос. 2015. № 4. С. 73-77.
3. Чельшев В. Д., Якимовец В. В. Радиоэлектронные системы органов административного и военного управления. СПб.: ВАС, 2006. 576 с.
4. Симонов А.Н., Волков Р.В., Дворников С.В. Основы построения и функционирования угломерных систем координатометрии источников

радиоизлучений // Санкт-Петербург, 2017. 248с.

5. Агиевич С.Н., Луценко С.А. Оценка помехоустойчивости спутниковых систем радиосвязи с фазоманипулированными широкополосными сигналами // Вопросы оборонной техники. Серия 16:Технические вопросы противодействия терроризму. 2018. № 9-10 (123-124). С. 132-137.
6. Агиевич С.Н., Луценко С.А., Тихонов С.С. Моделирование сигналов спутниковых систем связи и ретрансляции данных с применением методов сплайн-алгебраического гармонического анализа // Телекоммуникации. 2019. № 1. С. 16-22.
7. Луценко С.А. Методический аппарат деструктивного воздействия на спутниковые командно-программные радиолинии // Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды X Общероссийской научно-практической конференции. СПб.; Военмех, 2018. С. 276-280.
8. Агиевич С.Н., Гулидов А.А., Луценко С.А. и др. Способ радиоподавления спутниковых каналов управления. Патент РФ № 2677261 по заявке № 2017135778 от 06.10.2017
9. Агиевич С.Н., Пономарев А.А., Смирнов А.А. Модель радиосигнала OFDM на основе функций сплайн-понтрягина-виленкина-крестенсона для скрытного коммуникационного взаимодействия // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2011. № 4. С. 7-10.
10. Козлов С.Ю. Модель оценки воздушной радиоэлектронной обстановки в интересах обнаружения тактических БЛА // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 10. С. 555-561.

**Для цитирования:**

С. А. Луценко. Подход к расчету энергетического выигрыша при постановке помех системе цикловой синхронизации спутниковых линий связи. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 3. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/mar19/14/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.3.14