Постановка задачи нахождения оптимальных цифровых порогов обработки сигналов кадровой синхронизации в подсистеме кадровой синхронизации сети радиосвязи с подвижными объектами в условиях помех

Scenario of finding optimal digital thresholds for processing of frame synchronization signals in a frame synchronization subsystem of a radio network with mobile objects underinterference conditions

Смирнов / Smirnov D.
Дмитрий Вячеславович
(dv_smr@mail.ru)
доктор технических наук, доцент.
МОУ «Институт инженерной физики»,
генеральный директор – первый вице-президент.
Московская обл., г. Серпухов

Бекренев / Bekrenev S.
Сергей Александрович
(bekerel@mail.ru)
МОУ «Институт инженерной физики»,
научный сотрудник.
Московская обл., г. Серпухов

Чайков / Chaykov S.
Сергей Сергеевич
(ss_chay@mail.ru)
кандидат технических наук.
Филиал ФГКВОУ ВО «Военная академия РВСН имени Петра Великого» МО РФ в г. Серпухове,
заместитель начальника кафедры.
Московская обл., г. Серпухов

Ключевые слова: кадровая синхронизация – frame synchronization; цифровые пороги – digital thresholds; оптимизация – optimization.

В статье представлены особенности построения сети радиосвязи метрового диапазона с подвижными объектами и ее подсистемы кадровой синхронизации. Показано влияние структуры сигнала кадровой синхронизации и цифровых порогов на вероятностные характеристики процесса обработки данных сигналов. Обоснована необходимость применения сигналов кадровой синхронизации сложной структуры. Представлена математическая постановка задачи нахождения оптимальных цифровых порогов обработки сигнала кадровой синхронизации сложной структуры.

The article covers details related to the design of VHF-band radio network with mobile objects and its frame synchronization subsystem. Effect of frame synchronization signal structure and digital thresholds on probability characteristics of signal data processing has been demonstrated. The necessity for use of complex frame synchronization signals has been substantiated. Scenario of finding optimal digital thresholds for processing of complex frame synchronization signals has been presented.

Современные системы радиосвязи метрового диапазона с подвижными объектами востребованы и применяются в различных коммерческих, промышленных и государственных организациях, где необходимо оперативно организовать радиосвязь между подвижными и временными стационарными объектами. Применение систем такого типа планируется для обеспечения связью основных абонентов сети при решении ими ряда задач временного характера на ограниченном участке территории (≈150x150 км), в тех районах и ситуациях, где монтаж стационарной инфраструктуры связи экономически невыгоден, не обоснован или невозможен [2].

Структура рассматриваемой сети является иерархической и имеет топологию, представленную на рис. 1. В частности, показано наличие в структуре верхнего звена управления (ВЗУ), средних звеньев управления (СЗУ), нижних (исполнительных) звеньев управления (НЗУ), (l+1) уровень иерархии и норма управляемости k.

Каналы связи такой сети являются цифровыми радиоканалами, обеспечивающими скорость передачи информации до 16 кбит/с. В каждом таком канале, с помощью процедуры временного разделения каналов [2,3], организуются менее скоростные цифровые каналы передачи информации со скоростями 1,2–2,4 кбит/с. Для обеспечения устойчивого функционирования представленных каналов сети в типовых сегментах сети необходимо обеспечить установление и поддержание

4 2018.indd 11 12.12.2018 17:10:09

кадрового синхронизма между узлами коммутации (УК) в каждом типовом сегменте (ТС). Для решения данной задачи в сети функционирует подсистема кадровой синхронизации (ПКС), ее элементы размещаются во всех УК сети. Структура ПКС также является иерархической, сигналы кадровой синхронизации (СКС) передаются с верхних УК на нижние УК. Необходимо отметить, что процедура установления и поддержания кадрового синхронизма в каждом ТС осуществляется независимо от аналогичных процедур в других ТС сети. С учетом сказанного выше, можно утверждать, что установление в сети кадрового синхронизма обусловлено установлением кадрового синхронизма во всех ТС сети в целом и вероятность установления в сети кадрового синхронизма можно найти по формуле (1) при ограничениях, что все ТС одинаковые и моменты времени установления кадрового синхронизма во всех ТС совпадают [1]:

$$P^{\text{сети}}_{\text{уст кс}} = \left(P^{\text{ТС}}_{\text{уст кс}}\right)^{N^{\text{ТС}}}, \qquad (1)$$

где $P^{\text{ТС}}_{\text{уст кс}}$ – вероятность установления кадрового синхронизма в ТС сети;

$N^{\text{ТС}} = \sum_{i=0}^{l} k^i$ – число ТС в сети.

Для того чтобы найти вероятность установления кадрового синхронизма в ТС (2), необходимо рассмотреть особенности структуры СКС и физику процесса его обработки в каждом нижестоящем УК ТС [2,3]:

$$P^{\text{ТС}}_{\text{уст кс}} = \left(P^{\text{р/н}}_{\text{уст кс}}\right)^{k}. \qquad (2)$$

Базовым является СКС, представляющий собой псевдослучайную двоичную последовательность (ПСП) фиксированной длины ($L_{\text{скс}} = L_{\text{псп}}$). Вероятность установления кадрового синхронизма в системе "точка-точка" с помощью такого СКС будет равна вероятности его правильного приема в ПКС УК, с учетом установленного порога $\Pi_{\text{скс}}$ (3).

$$P_{\text{пр псп}} = P^{\text{р/н}}_{\text{уст кс}} = \sum_{i=\Pi_{\text{псп}}}^{L_{\text{псп}}} C_i^{L_{\text{псп}}} (1-p_o)^i (p_o)^{L_{\text{псп}}-i}, \qquad (3)$$

где p_0 – вероятность ошибки (искажения) одного двоичного символа;

$\Pi_{\text{псп}} = \Pi_{\text{скс}}$ – цифровой порог обнаружения ПСП.

Однако при ведении информационного обмена в системе "точка-точка" возможно ложное формирование СКС. Данное событие является крайне вредным, и его вероятность на длительности суперкадра ($T_{\text{ск}}$), при допущении о равновероятном появлении на входе цифрового приемника СКС символов "0" и "1", можно найти по формуле:

$$P^{\text{р/н}}_{\text{лс}} = 1-(1-(0{,}5)^{\Pi_{\text{скс}}})^{N_{\text{попыток}}}, \qquad (4)$$

$$N_{\text{попыток}} = \left]\frac{T_{\text{ск}}}{\tau_{\text{дв.с}}}\right[- \Pi_{\text{псп}}, \qquad (5)$$

где $\tau_{\text{дв.с}}$ – длительность одного двоичного символа [с];

$T_{\text{ск}}$ – период передачи СКС (период суперкадра) [с];

] [– оператор выделения целой части числа.

В зоне функционирования рассматриваемой сети предполагается наличие злоумышленника, который имеет задачу перехвата и распознавания СКС с целью его имитации для нарушения работы ПКС сети и орга-

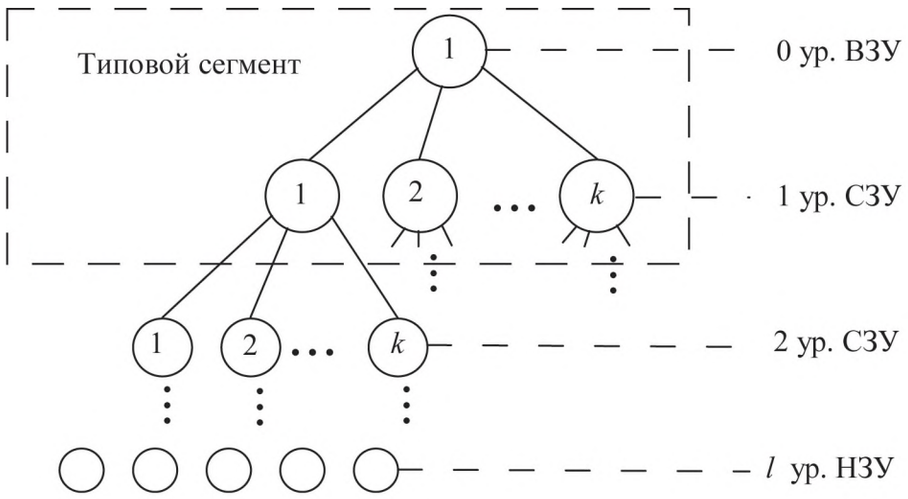

Рис. 1. Топология радиосети иерархической структуры

4 2018.indd 12 12.12.2018 17:10:10

низации перерывов информационного обмена между УК ТС сети. Событие, заключающееся в установлении ложного кадрового синхронизма в радионаправлении "точка-точка" по причине передачи злоумышленником ложного СКС (ЛСКС), является сложным и характеризуется вероятностью постановки имитационной помехи, которая может быть найдена по формуле

$$P_{пип} = P_{расп.скс} \cdot P_{дов.лскс}, \qquad (6)$$

где $P_{расп.скс}$ – вероятность правильного распознавания злоумышленником СКС (согласно алгоритма распознавания);

$P_{дов.лскс}$ – вероятность правильного приема ЛСКС в ПКС УК, вычисляется по формуле (3) при условии ($L_{лскс} = L_{псп}$ и p_0 для ЛСКС и СКС одинакова).

Для нахождения $P_{расп.скс}$ положим, что для верного распознавания ПСП злоумышленнику необходимо без искажения принять $2n$ (n – степень образующего полинома) или более символов ПСП подряд. Тогда $P_{расп.скс}$, учитывая, что на $T_{ск}$ СКС передается один раз, можно рассчитать по формуле

$$P_{расп.скс} = \sum_{i=0}^{2^n-2n} \left(2^n - b\right) \cdot \left(1 - p_0\right)^b \cdot \left(p_0\right)^{L_{скс}-b}, \qquad (7)$$

где $b = 2n + i$ – размер блока – число двоичных символов.

Проведенные ранее исследования показали, что увеличение $L_{скс} = L_{псп}$ при максимальном пороге его обработки приводит к уменьшению $P_{пр\ псп}$, уменьшению $P_{лс}^{р/н}$ и увеличению $P_{пип}$. Уменьшая порог обработки СКС ($П_{скс}$), можно добиться $P_{пр\ псп} \geq P^{тр}_{пр\ псп}$, однако значения $P_{лс}^{р/н}$ и $P_{пип}$ при этом примут значения намного выше требуемых, что недопустимо (таблица 1).

Для снижения $P_{лс}^{р/н}$ и $P_{пип}$ (причем данный способ нацелен больше снизить $P_{пип}$) предлагается использовать СКС сложной структуры (рис. 2).

Логично предполагать, что злоумышленнику будет сложнее распознать СКС такой структуры, что приведет к уменьшению компонентов формулы (6), а, следовательно, и к снижению $P_{пип}$.

Тогда $P_{расп.скс}$ и $P_{дов.лскс}$, с учетом физики процесса обработки СКС сложной структуры злоумышленником и своим приемником, надо рассчитывать по формулам (8) и (9) соответственно. Как и в первом случае на вероятностные характеристики процесса обработки СКС сложной структуры существенное влияние оказывают цифровые пороги ($П_{скс}$ и $П_{псп}$). Очевидно, что существуют их оптимальные значения, определяемые по критерию Неймана-Пирсона [4], – максимум $P_{пр\ скс}$ при ограничениях на $P_{лс}^{р/н}$ и $P_{пип}$ (10) или по критерию мини-

Таблица 1

Результаты расчетов при p_0 = 0,01

p_o = 0,01		$П_{скс}$		
	$L_{скс}$	$L_{скс}$	$L_{скс}$–1	$L_{скс}$–2
$P_{лс}$	32	$0{,}23*10^{-9}$	$0{,}77*10^{-8}$	$0{,}123*10^{-6}$
$P_{пр\ псп}$	32	0,72	0,959	0,996
$P_{пип}$	32	0,54	0,72	0,74
$P_{лс}$	64	$0{,}54*10^{-19}$	$0{,}35*10^{-17}$	$0{,}113*10^{-15}$
$P_{пр\ псп}$	64	0,53	0,865	0,93
$P_{пип}$	64	0,29	0,47	0,5
$P_{лс}$	128	$0{,}29*10^{-38}$	$0{,}38*10^{-36}$	$0{,}24*10^{-34}$
$P_{пр\ псп}$	128	0,28	0,63	0,863
$P_{пип}$	128	0,08	0,18	0,25

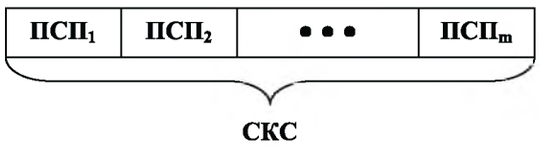

Рис. 2. СКС сложной структуры

4 2018.indd 13 12.12.2018 17:10:12

мума $P_{пип}$ при обеспечении заданного уровня $P_{пр\ скс}$ и ограничениях на $P_{лс}^{р/н}$ (11):

$$P_{пр\ скс} = f(p_0, \Pi^*_{скс}, \left\{\Pi^*_{1псп}, \Pi^*_{2псп}, \ldots, \Pi^*_{m\ псп}\right\}, n, m) \to \max \quad при \quad \begin{matrix} P_{лс}^{р/н} \le P_{лс\ треб}^{р/н} \\ P_{пип} \le P_{пип}^{треб} \end{matrix} \qquad (10)$$

$$P_{пр\ скс} = f(p_0, \Pi^*_{скс}, \left\{\Pi^*_{1псп}, \Pi^*_{2псп}, \ldots, \Pi^*_{m\ псп}\right\}, n, m) \to \min \quad при \quad \begin{matrix} P_{лс}^{р/н} \le P_{лс\ треб}^{р/н} \\ P_{пип} \ge P_{пип}^{треб} \end{matrix} \qquad (11)$$

Решение задач (10) и (11) позволит получить два множества оптимальных значений цифровых порогов для реализации в приемной аппаратуре двух соответствующих режимов работы ПКС.

Литература

1. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей: Учебник для студ. вузов / Е.С. Вентцель – 10-е изд., стер. – М.: Издательский центр "Академия", 2005. – 576 с.

2. Чайков, С. С. Нахождение оптимальных параметров подсистемы кадровой синхронизации с временным разделением каналов и ШПС-ФМ синхросигналами в сети радиосвязи метрового диапазона с подвижными объектами / С.С. Чайков, Д.В. Смирнов, С.А. Бекренев // Известия Ин-та инженерной физики. – 2015. – № 4. – С. 36–40.

3. Смирнов, Д. В. Формализация задачи определения оптимальных параметров подсистемы кадровой синхронизации при реализации временного разделения каналов в сети радиосвязи метрового диапазона с подвижными объектами для сигналов кадровой синхронизации сложной структуры / Д.В. Смирнов, С.С. Чайков, С.А. Бекренев // Междун. конф. «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (REDS-2016) ; Доклады ; Серия: науч. конф. посвящ. Дню радио / Рос. науч.-техн. общ. радиотехн., электрон. и связи им. А.С. Попова. – М. : ООО «БРИС-М», 2016. – Вып. LXXI. – С. 490–492.

4. Буга, Н. Н. Основы теории связи и передачи данных / Н.Н. Буга. – Ленинград.: Типография ЛВИКА им. А.Ф. Можайского, 1968. – 548 с.

4 2018.indd 14 12.12.2018 17:10:13