

УДК 621.396.933

Н. Е. Липаков

АО "Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры"
("ВНИИРА") (Санкт-Петербург)

Применение единого точного времени в системе ранговой синхронизации подвижных абонентов

Рассмотрены принципы построения системы межсамолетной навигации, использующей в подсистеме ранговой синхронизации автономное и единое точное время. Предложен улучшенный алгоритм работы подсистемы ранговой синхронизации, обеспечивающий взаимодействие группы абонентов в условиях непостоянства связи с источником единого точного времени.

Межсамолетная навигация, ранговая синхронизация, ранжирующие признаки, единое точное время

Основные принципы построения локальной радиотехнической системы (ЛРТС) межсамолетной навигации (МСН) изложены в [1]–[3], а принципы построения подсистемы ранговой синхронизации (ПРС) абонентов системы ЛРТС МСН, обеспечивающие устойчивое взаимодействие в автономной группе непостоянного состава, – в [4], [5], продолжением которых является данная статья.

Основной задачей, решаемой ПРС, является согласование автономных шкал времени (ШВ) некоторого числа абонентов системы ЛРТС МСН N , работающей по принципу множественного доступа с временным разделением. При таком построении каждому абоненту выделяется свой рабочий интервал (РИ), последовательность которых образует полный цикл информационного обмена длительностью T_c . Момент t_{0i} начала цикла информационного обмена – "нуля" автономной шкалы времени i -го абонента однозначно связан с моментом t_{S_i} излучения им в своем РИ $_i$ синхронизирующих импульсов S_i следующим образом:

$$t_{S_i} = (i-1)T_{\text{РИ}} + \Delta t_s,$$

где $T_{\text{РИ}} = T_c/N$ – длительность одного рабочего интервала; Δt_s – однозначно заданное в системе положение синхроимпульса в пределах рабочего интервала (рис. 1).

Общее согласование ШВ в системе заключается в подстройке временных сеток всех абонентов под ШВ одного из них, выбираемого по опре-

деленной иерархии в качестве глобального синхронизатора (ГС). ШВ ГС считается прочими абонентами эталонным временем (ЭВ), которое посредством синхронизирующих импульсов передается от ГС прочим абонентам для определения моментов t_{0i} .

Любой j -й абонент, с некоторой случайной погрешностью δ_j зафиксировав в момент t'_{S_i} своей шкалы синхроимпульсы S'_i от i -го абонента (рис. 1), может определить рассогласование шкал времени $\Delta T'_{ij} = t_{S_i} - t'_{S_i} = \Delta T_{ij} - t_d + \delta_j$, где

$$t_d = D_{ji}/c \quad (1)$$

– время распространения сигнала, причем D_{ji} – дальность между абонентами i и j ; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. После этого абонент может скорректировать свою шкалу времени до постоянного смещения относительно эталонной на величину t_d . Поскольку

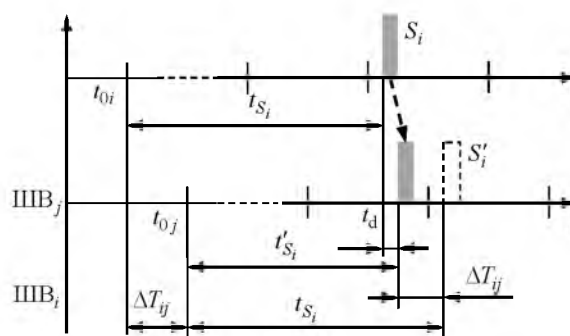


Рис. 1

расстояние D между подвижными абонентами изменяется случайным образом в пределах от 0 до максимально допустимого удаления между абонентами D_{\max} , так же будет изменяться и величина t_d , ограничивающая точность автономной синхронизации и определяющая минимально необходимую длительность защитных интервалов (ЗИ) $t_{ЗИ}$ между сигналами абонентов в начале и конце слота. К примеру, для ЛРТС с параметрами $N = 100$, $T_c = 1$ с, $T_{РИ} = 10$ мс, $D_{\max} = 150$ км получим два защитных интервала длительностью $t_{ЗИ} > t_d = 0,5$ мс каждый, занимающих в каждом РИ суммарную долю:

$$\eta_{ЗИ} = 2t_d/T_{РИ} = 2 \cdot 0,5/10 = 0,1,$$

т. е. 10 % рабочего времени, что является достаточно большой величиной. Для сравнения, при синхронизации на базе сигналов спутниковой радионавигационной системы (СРНС) погрешность синхронизации шкалы времени любого абонента составляет $\sigma_{t_0} = 50 \dots 500$ нс [6], что на 3–4 порядка меньше. Это позволяет, предусмотрев в циклограмме только один защитный интервал ($\eta_{ЗИ} = 0,05$), достичь большего временного уплотнения абонентов. Однако такой вариант синхронизации имеет существенные недостатки, которые рассмотрены далее.

После установки первичной синхронизации j -й абонент в пределах своего РИ методом "запрос-ответ" или путем информационного обмена определив дальность D_{ji} до своего локального синхронизатора (ЛС) – i -го абонента может дополнительно скомпенсировать расхождения их ШВ на величину t_d (1), минимизировав погрешность синхронизации до случайного значения $\delta_j \ll t_d$.

Применение дополнительной компенсации сдвига ШВ при автономной синхронизации абонентов не отменяет необходимость использования защитных интервалов, но уменьшает погрешность рассогласования между ШВ первого и последнего абонентов при последовательной передаче ЭВ по цепи абонентов-ретрансляторов. Например, в цепи из n абонентов при передаче ЭВ от первого до n -го получаем суммарную погрешность синхронизации:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_2 + \delta_3 + \dots + \delta_n = \bar{\delta}(n-1), \quad (2)$$

где δ_i – погрешность синхронизации, вносимая i -м абонентом; $\bar{\delta}$ – усредненное значение, харак-

теризующее типовую погрешность синхронизации в аппаратуре абонента ЛРТС.

Иерархия в системе определяется наличием у каждого абонента "ранга" – уникальной количественной характеристики, формируемой на основе ранжирующих признаков – ненавигационных параметров, которыми обмениваются абоненты для определения места каждого из них в структуре передачи ЭВ. Первоначально в методе многоуровневой синхронизации, предложенном в ЛРТС МСН [1], первый ранжирующий признак определял тип ГС для абонента (автономный объект, наземная станция или ГНСС), второй признак – номер ГС, а третий – собственный номер абонента. В [4] показано, что минимально необходимый набор ранжирующих признаков $\mathbf{C}_i = [a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}]$, обеспечивающий формирование устойчивой и адаптивной к изменениям состава группы структуры передачи ЭВ, должен содержать номер ГС a_{i1} и удаленность от него a_{i2} , выраженную в шагах ретрансляции ЭВ, а также собственный номер абонента a_{i3} . Для указанного набора ранжирующих признаков были определены вектор-функция \mathbf{F}_R вычисления ранга и функция f_E определения номера ЛС E_i [5], позволяющие каждому абоненту на основании матрицы наблюдения

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i(k) &= [\mathbf{C}_1^T(k) \dots \mathbf{C}_n^T(k)]^T = \\ &= \begin{bmatrix} a_{11}(k) & a_{12}(k) & a_{13}(k) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1}(k) & a_{n2}(k) & a_{n3}(k) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

на шаге k однозначным образом определить свое место в структуре передачи ЭВ.

Номер ЛС определяется как

$$\begin{aligned} E_i(k+1) &= f_E[\mathbf{A}_i(k)] = \\ &= \begin{cases} \min[a_{i3}(k), E_i(k)], \mathbb{Z}_{ЛС}; \\ \min(a_{j3}(k) | a_{j2}(k) = \\ = \min\{a_{r2}(k) | a_{r1}(k) = \min[\mathbf{A}_i^1(k)]\}), \overline{\mathbb{Z}_{ЛС}}, \end{cases} \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \mathbb{Z}_{ЛС} &= [a_{j1}(k) > a_{j1}(k-1)] \wedge \\ &\wedge [E_i(k-1) = a_{j3}(k-1) \neq a_{i3}(k-1)] \quad (3) \end{aligned}$$

– оператор условия ("∧" – символ булевой операции "И"); выражение вида $M|B$ обозначает множество M абонентов, обладающих признаком B .

Условие (3) имеет следующий смысл: абонент i , у которого на шаге работы $(k-1)$ ЛС E_i был абонент $j \neq i$, фиксирует понижение ранга ЛС, после чего выбирает новый ЛС, устанавливая ранг не ниже собственного. Необходимо отметить, что в силу уникальности признаков $a_{j3}(k)$ при выборе элементов по значениям этих признаков подмножества всегда будут содержать только один элемент – номер ГС. Напротив, признаки $a_{j1}(k)$ и $a_{j2}(k)$ не являются уникальными и при выборе по значениям этих признаков подмножества могут содержать произвольное число элементов.

Обобщенная вектор-функция вычисления ранга имеет вид

$$\mathbf{F}_R : \begin{cases} a_{i1}(k+1) = f_1[A_i(k)]; \\ a_{i2}(k+1) = f_2[A_i(k)]; \\ a_{i3}(k+1) = f_3[A_i(k)] = a_{i3}(k), \end{cases}$$

в котором функция f_3 собственный номер абонента не изменяет, а функции определения номера ГС f_1 и удаленности от него f_2 определяются следующими выражениями:

$$f_1[A_i(k)] = \begin{cases} a_{i3}(k), \mathbb{Z}_{11}; \\ \min\{a_{i3}(k), E_i(k)\}, \mathbb{Z}_{\text{ЛС}}; \\ \min\{\mathbf{A}_i^1(k) \setminus a_{j1}(k) = a_{i1}(k-1)\}, \mathbb{Z}_{13}; \\ \min\{\mathbf{A}_i^1(k)\}, \overline{\mathbb{Z}_{11} \wedge \mathbb{Z}_{\text{ЛС}} \wedge \mathbb{Z}_{13}}; \end{cases} \quad (4)$$

$$f_2[A_i(k)] = \begin{cases} 0, \mathbb{Z}_{11}; \\ 0, \mathbb{Z}_{22}; \\ a_{j2}(k) + 1, \mathbb{Z}_{23}; \\ \min\{a_{j2}(k) \mid a_{j1}(k) = \\ = \min[\mathbf{A}_i^1(k)]\} + 1, \\ \overline{\mathbb{Z}_{11} \wedge \mathbb{Z}_{22} \wedge \mathbb{Z}_{23}}, \end{cases} \quad (5)$$

где

$$\mathbb{Z}_{11} = [E_i(k+1) = a_{i3}(k)] \wedge [a_{i1}(k) < a_{i3}(k)];$$

$$\mathbb{Z}_{13} = a_{i1}(k) > a_{i1}(k-1);$$

$$\mathbb{Z}_{22} = \mathbb{Z}_{\text{ЛС}} \wedge [a_{i1}(k+1) = a_{i3}(k)];$$

$$\mathbb{Z}_{23} = [a_{i1}(k+1) = a_{j1}(k) \mid a_{j3}(k-1) = E_i(k)] \wedge \mathbb{Z}_{13};$$

$\mathbf{A}_i^1(k)$ – первый столбец матрицы наблюдения; выражение вида $M \setminus B$ обозначает исключение из множества M абонентов, обладающих признаком B .

Для функции f_1 (4) условия $\mathbb{Z}_{11} \dots \mathbb{Z}_{13}$ имеют следующий смысл. Условие \mathbb{Z}_{11} (первая строка) определяет ситуацию, когда абонент на шаге $(k+1)$ выбирает себя в качестве ЛС $[E_i(k+1) = a_{i3}(k)]$, но имеет при этом собственный номер больше, чем номер ГС $[a_{i1}(k) < a_{i3}(k)]$. В этом случае номер ГС устанавливается равным собственному номеру абонента. Во второй строке определено то же условие, что и для функции f_E при понижении ЛС своего ранга. Условие \mathbb{Z}_{13} (третья строка) соответствует ситуации, когда абонент на предыдущем шаге понизил свой ранг $[a_{i1}(k) > a_{i1}(k-1)]$. При этом из рассмотрения в качестве ЛС исключаются все абоненты с номером ГС, равным номеру, отброшенному абонентом i на предыдущем шаге.

Для функции f_2 (5) условия задания трактуются аналогичным образом. В первой строке записано то же условие, что и для функции f_1 . Во второй строке (\mathbb{Z}_{22}), как и в предыдущем случае, определяется ситуация понижения ранга, но с дополнительным условием $a_{i1}(k+1) = a_{i3}(k)$, означающим, что абонент после понижения ранга своим ЛС выбрал на следующем шаге в качестве ЛС самого себя. В третьей строке определен случай, когда i -й абонент по-прежнему полагает своим ЛС абонента j , понизившего свой ранг.

Совокупность приведенных функций и ранжирующих признаков определила базовый алгоритм работы ПРС, позволяющий организовать ее устойчивое функционирование в составе ЛРТС МНС даже без использования признака "тип ГС", что обеспечивает одно из важнейших свойств системы – автономность работы.

Однако, несмотря на то что базовый алгоритм работы ПРС обеспечивает устойчивое перераспределение рангов в системе, процедура непосредственной синхронизации (подстройки временных шкал) в группе абонентов в целом может быть значительно менее устойчивой, что связано со случайным разбросом начального положения моментов t_0 в пределах интервала $[0, T_c]$. Вследствие этого при вхождении нового синхронизатора в сеть уже синхронизированные между собой абоненты автономной группы с большой вероятностью будут выполнять подстройку своих сеток на величину $\Delta T \gg T_{\text{РИ}}$, при этом на время переходного процесса между частью абонентов

группы сможет исчезнуть связность и общая пропускная способности сети снизится. Снижение влияния указанного разброса может быть достигнуто при использовании абонентами для начальной синхронизации своей циклограммы шкалы единого точного времени (ЕТВ), привязка к которой с помощью односекундных меток времени, формируемых бортовой аппаратурой потребителя системы СРНС ГЛОНАСС (или GPS), обеспечивает однозначность положения РИ и согласование циклограмм абонентов. Использование ЕТВ в качестве ЭВ с наивысшим приоритетом позволяет с высокой точностью синхронизировать циклограммы и организовать информационное взаимодействие в системе МСН без синхронизации абонентов с помощью ПРС и постоянного применения дополнительной компенсации расхождения их ШВ. Назначение наивысшего приоритета для источника ЕТВ может быть осуществлено включением в набор ранжирующих признаков $C_i(k)$ в качестве первого признака "тип источника ЭВ", имеющий наибольший вес и в простейшем случае значение "0" при синхронизации собственной ШВ от ЕТВ, и "1" для автономной синхронизации. С учетом этого для любого абонента $i \in \overline{1, n}$ расширенный набор ранжирующих признаков будет записан в виде

$$C_i(k) = [a_{i0}(k) \ a_{i1}(k) \ a_{i2}(k) \ a_{i3}(k)], \quad (6)$$

где a_{i0} – тип источника ЭВ, а определенные ранее ранжирующие признаки остаются неизменными: a_{i1} – номер ГС; a_{i2} – удаленность от ГС и a_{i3} – собственный номер абонента. Однако при определении для набора (6) функций F_R и f_E необходимо учесть, что использование ЕТВ для синхронизации абонентов имеет существенные ограничения.

Во-первых, одновременное наличие у всех абонентов значения ЕТВ не гарантировано, поскольку связь абонента с СРНС может отсутствовать, если он находится за пределами радионавигационного поля СРНС, например в горной местности или в зоне действия активных помех. В результате ШВ такого абонента, потерявшего информацию о ЕТВ, вследствие погрешности опорного генератора и ухода бортовых часов постепенно сместится относительно шкалы ЕТВ, абонент выйдет за пределы своего РИ и связь между ним и остальными абонентами будет потеряна. Указанная ситуация может возникнуть, если наличие ЕТВ у каждого абонента системы будет строго обязательным.

Вторым существенным ограничением является обязательное требование возможности автономной работы ЛРТС при отсутствии взаимодействия с внешними системами. Поскольку источником абсолютных координат абонента могут являться автономные средства, взаимодействие абонентов ЛРТС может осуществляться и без наличия ЕТВ и взаимодействия с СРНС, при этом синхронизация будет осуществляться на автономном уровне с помощью ПРС.

Отсюда следует, что при организации взаимодействия в группе равноправных абонентов переменного состава ЕТВ должно применяться в качестве не обязательного, а вспомогательного средства, обеспечивающего синхронизацию относительно шкалы ЕТВ (на глобальном уровне), а ПРС при этом должно обеспечивать адаптивный переход между глобальным и автономным уровнями синхронизации при потере абонентом связи с СРНС.

Для определения принципов использования информации о ЕТВ в ПРС рассмотрим вариант взаимодействия группы абонентов (рис. 2), на котором линиями показаны радиоканалы взаимодействия между абонентами, а стрелками – направление передачи ЭВ. Абоненты, находящиеся в зоне действия (ЗД) СРНС (a – рис. 2), имеют информацию о ЕТВ, которое ретранслируется прочим абонентам системы, такой информации не имеющим.

Все находящиеся в пределах ЗД СРНС абоненты даже при отсутствии между ними взаимодействия синхронизированы между собой через СРНС, поэтому применение к ним методов автономной синхронизации не только не необходимо, но даже нежелательно. Поскольку каждая подстройка ШВ одного абонента под ШВ другого будет вносить случайную погрешность величиной t_d , в результате в пределах ЗД СРНС только ГС

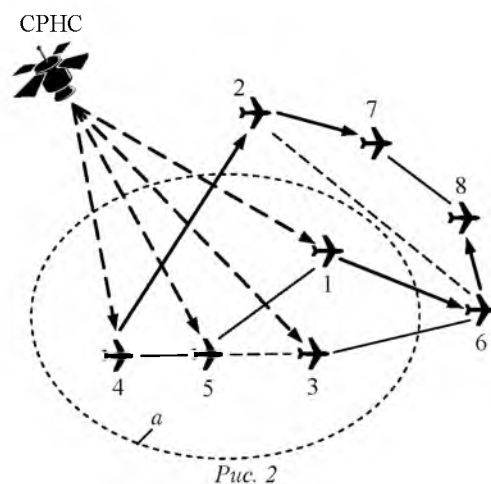


Рис. 2

(абонент с наименьшим номером) будет иметь несмещенную ШВ относительно шкалы ЕТВ, а прочие абоненты фактически будут лишены точной синхронизации. Отсюда следует, что если у i -го абонента есть информация о ЕТВ, функция f_E должна выбирать в качестве ЛС самого абонента, т. е. устанавливать $E_i(k+1) = a_{i0}(k)$.

При этом следует различать, получена ли информация от собственного источника ЕТВ или от другого абонента. К примеру, если абонент 6 (рис. 2) получает на шаге k информацию о ЕТВ от абонента 1 и устанавливает $a_{60}(k+1) = 1$, то далее он определит $E_6(k+2) = a_{63}(k+1) = 6$, выбрав себя в качестве ЛС, и в дальнейшем вследствие неточности бортовых часов выйдет из взаимодействия с группой абонентов. Для устранения такой ситуации необходимо предусмотреть признак, показывающий, что для абонента информация о ЕТВ является заимствованной, для чего ввести дополнительную градацию признака "тип источника ЭВ": $a_{i0} = 0$ – собственный источник ЕТВ, $a_{i0} = 1$ – заимствованное ЕТВ, $a_{i0} = 2$ – информация о ЕТВ отсутствует (автономная синхронизация). Кроме того, для абонентов, находящихся за пределами ЗД СРНС, при определении ГС необходимо определять длину маршрута ретрансляции ЭВ не от абонента с наименьшим номером из имеющих признак $a_{i0} = 0$, а от ближайшего из них, т. е. увеличивать признак a_{i2} удаленности от ГС, только если $a_{i0} = 1$. Смысл этого правила показан на примере абонента 7 (рис. 2), взаимодействующего с абонентами 8 и 2. Формально маршрут $1 \rightarrow 6 \rightarrow 8$ короче маршрута $1 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 2$, поэтому при расчете признака a_{i2} с помощью (5) будет получено $a_{82} = 2$ и $a_{22} = 3$. При равенстве признаков "тип источника ЭВ" $a_{20} = a_{80} = 1$ и "номер ГС" $a_{21} = a_{81} = 1$ абонент 7 выберет в качестве ЛС абонента 8, что с точки зрения физического смысла неверно: абонент 8, получающий ЕТВ от абонента 1 через абонента 6, имеет большую погрешность синхронизации (2), чем абонент 2, непосредственно взаимодействующий с источником ЕТВ. Если же абоненты 1, 3, 4 и 5 принудительно установят признак "удаленность от ГС" $a_{12} = a_{32} = a_{42} = a_{52} = 0$, то далее будут сфор-

мированы признаки $a_{22} = a_{62} = 1$ и $a_{82} = 2$, после чего абонент 7 сможет выбрать более короткий маршрут до источника ЭТВ.

В рассмотренном примере абонент 6 по признаку "тип источника ЭВ" ($a_{60} = 1$) всегда будет уступать абонентам 1 и 3 с признаками $a_{10} = a_{30} = 0$ и выбирать абонента 1 своим ЛС: $E_6(k+1) = a_{13}(k) = 1$. При этом он также будет осуществлять взаимодействие и с абонентом 3, поскольку оба они будут синхронизированы от ЕТВ. Абоненты 4 и 5 согласно правилу (6) в качестве ЛС выберут самих себя, вследствие чего по маршруту $1 \rightarrow 5 \rightarrow 4$ передача ЭВ не будет выполняться.

Выработка значений ранжирующих признаков и номера ЛС должна осуществляться не только на основании матрицы наблюдения $A_i(k)$, но и дополнительного признака UTC_i , показывающего наличие ($UTC_i = 1$) или отсутствие ($UTC_i = 0$) у i -го абонента информации о ЕТВ. При этом необходимо предусмотреть ситуацию, когда абонент теряет связь с источником ЕТВ – СРНС или другим ЛА. Первому случаю будет соответствовать условие $UTC_i(k) = 0 < UTC_i(k-1) = 1$, при выполнении которого абонент i должен:

- перейти к синхронизации от одного из наблюдаемых абонентов $j \neq i$ с признаком $a_{j0}(k+1) = 0$;

- при отсутствии таких абонентов выбрать себе новый ЛС из числа абонентов с признаком $a_{j0}(k+1) = 1$, исключив из рассмотрения на шаге k своих "ведомых" – взаимодействующих абонентов с признаком $a_{j1}(k+1) = a_{i3}(k)$;

- при отсутствии абонентов, обладающих указанными ранее свойствами – понизить свой ранг до уровня автономной синхронизации [$a_{i0}(k+1) = 2$], по-прежнему исключая на всех последующих шагах $k+1, k+2, \dots$ из рассмотрения своих "ведомых".

Выполнение указанных действий позволит корректно понизить ранг всей цепи абонентов, синхронизированных от абонента i и избежать заикливания в передаче ЭВ.

Второй в отличие от первого сопровождается потерей как минимум одной связи в группе, поэтому является несколько более сложным. Рассмотрим его на примере группы, показанной на

рис. 2, в которой происходит потеря связи между объектами в цепи 4→2→7. В таком случае, определяя номер ЛС на следующем шаге по правилу:

$$E_i(k+1) = \min \left[a_{j_3}(k) \middle| a_{j_2}(k) = \min \left(a_{r_2}(k) \middle| a_{r_1}(k) = \min \left\{ a_{n_1} \middle| a_{n_0} = \min \left[A_i^1(k) \right] \right\} \right) \right], \quad (7)$$

получаем $E_i(k+1) = a_{i_3}(k)$, что при равенстве $a_{n_0}(k) = 1$ должно приводить либо к принудительному понижению ранга до уровня автономной синхронизации: $a_{i_0}(k+1) = 2$, $a_{i_1}(k+1) = a_{i_3}(k)$ и $a_{i_2}(k+1) = 0$, либо к выбору в качестве ЛС другого абонента с рангом не ниже собственного, например, формированию связи 6→2 и установке $a_{2_0}(k+1) = 1$; $a_{2_1}(k+1) = a_{6_1}(k) = 1$ и $a_{2_2}(k+1) = a_{6_2}(k) + 1 = 2$, т. е. понижению ранга по признаку удаленности от ГС.

Переход на уровень автономной синхронизации реализуется, если в определенном в (7) множестве номеров абонентов $\{a_{j_3}(k)\}$, имеющих минимальные значения первых трех ранжирующих признаков (кроме собственного номера), номер абонента i является единственным элементом. Иначе при исключении абонентом i из рассмотрения собственного номера $a_{i_3}(k)$ возможно определить новый ЛС – ретранслятор ЭВ, что будет равносильно наличию дополнительного условия в (7), которое и будет служить критерием различия, указывая, что при таком исключении множество рассматриваемых абонентов не становится пустым:

$$E_i(k+1) = \min \left(a_{j_3}(k) \setminus a_{i_3}(k) \middle| \dots \right) \neq \emptyset.$$

Абонент, понизивший свой ранг по признаку a_{i_0} , на следующем шаге $k+1$ при выборе ЛС, как и в вышеприведенных примерах, должен будет исключать из рассмотрения всех взаимодействующих с ним абонентов, определяемых по признаку $a_{j_0}(k+1) = 1$, из числа которых на шаге $k+1$ "ведомые" также понизят свой ранг, а абоненты, сохранившие значение признака $a_{j_0}(k+2) = 1$, могут быть выбраны в качестве нового ЛС. Абонент, синхронизирующийся от понизившего свой ранг, также будет его понижать. Так, абонент 7 (см. рис. 2), который вслед за абонентом 2 либо установит $a_{7_0}(k+2) = 2$; $a_{7_1}(k+2) = 2$ и $a_{7_2}(k+2) = 1$, либо, при потере связи 4→2 и наличии дополнительной связи 6→2 (см. штриховую линию на

рис. 2), установит $a_{7_0}(k+2) = 1$; $a_{7_1}(k+2) = 1$ и $a_{7_2}(k+2) = 2$.

Особенность процедуры понижения ранга абонентом рассмотрим на примере рис. 3, на котором показана группа из шести абонентов, образующих цепь. При потере абонентом 1 связи с СРНС и установке $UTC_1(k) = 0$ и $a_{1_0}(k+1) = 0$ волна сброса рангов до уровня автономной синхронизации дойдет до абонента 6 за 5 шагов ретрансляции. Если до момента понижения абонентом 6 своего ранга (например на шаге $k+3$) между ним и абонентом 1 установится новая связь (штриховая линия на рис. 3), то абонент 1, обнаружив признак $a_{6_1}(k+3) = a_{1_3}(k+3)$, исключит объект 6 из рассмотрения при выборе ЛС и останется на уровне автономной синхронизации. Приведенное рассуждение верно и в любом другом случае, когда информация об ЭВ, имеющая признак "номер ГС", вновь достигнет своего источника – самого ГС, которым будет отброшена как устаревшая. В противоположность этому, если в процессе работы пропадет связь между абонентами 1 и 2, то возможное образование новой связи между абонентами 6 и 2 может понизить устойчивость взаимодействия в группе, поскольку в информации об ЭВ, переданном от 6, обладающего признаком $a_{6_0} = 0$, абоненту 2 с признаком $a_{2_0} = 2$, нет сведений о том, что ЭВ объекта 6 действительно получено от абонента 2, а не от абонента 1, который мог в процессе понижения рангов абонентами вновь установить связь с кем-либо. Если бы каждый из N абонентов группы при передаче ЭВ дополнительно передавал в виде набора из N бит сведения о номерах абонентов, через цепь которых была выполнена ретрансляция, то это позволило бы каждому i -му абоненту исключать из рассмотрения источники ЭВ, для которых его собственный признак передачи уже установлен. Однако передача такой информации потребует N бит, что приемлемо для небольшого числа абонентов в группе, а при значительном их числе приводит к увеличению тре-

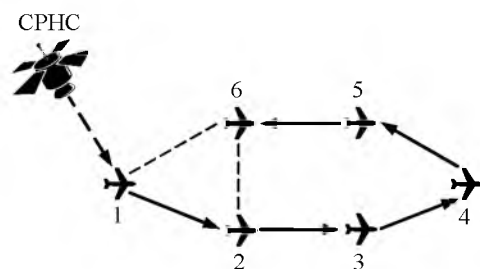


Рис. 3

буемого объема передаваемой служебной информации и вероятности ошибки. Например, в группе из $N=100$ абонентов набор ранжирующих признаков $C_i(5)$ будет занимать:

$$I = \sum_{j=0}^4 \left\lceil \log_2(a_{j\max}) \right\rceil = \\ = 2 + 2 \left\lceil \log_2 N \right\rceil + \left\lceil \log_2(N-1) \right\rceil = 23 \text{ бит,}$$

где $a_{j\max}$ – наибольшее возможное значение ранжирующего признака с номером j ; $\lceil \cdot \rceil$ – символ округления значения аргумента до ближайшего большего целого. Передача же информации о пути распространения ЭВ увеличит набор C_i за счет включения дополнительного ранжирующего признака a_{i4} , содержащего дополнительные 100 бит. В результате I увеличится в

$$I'/I = (I+N)/I = 123/23 \approx 5.3478,$$

т. е. более чем в пять раз.

Для сохранения неизменным вероятности правильного приема информации $P = (1-q)^I$ (q – вероятность ошибки в приеме одного бита) должно обеспечиваться соблюдение неравенства

$$P = (1-q)^I \leq P' = (1-q')^{I+N}.$$

Для $N=100$ и $P=0.95$ получаем $q \approx 2.23 \cdot 10^{-3}$, $q' \leq 4.17 \cdot 10^{-4}$ и $q/q' \geq 5.343$, откуда следует, что для передачи $I'=123$ бит информации может потребоваться применение более сложных сигналов, в то время как для $I=23$ бит вполне достаточно использовать простые сигналы, обеспечивающие при типичном значении отношения "сигнал/шум" 3 вероятность ошибки приема одного бита $q = 10^{-2} \dots 10^{-3}$ [7].

Другим способом устранения закливаний при передаче ЭВ, не требующим усложнения аппаратуры абонента ЛРТС, является установка ограничения на максимальное значение ранжирующего признака $a_{i2} \leq N-1$, поскольку в цепи из N абонентов максимально возможное удаление последнего абонента от первого как раз составляет $N-1$ шагов ретрансляции. Для группы абонентов, показанной на рис. 3, ситуация закливания в передаче ЭВ, полученного на шаге k абонентом 2 от абонента 6 со значением признака $a_{62}(k) = 5$ будет продолжаться в течение

$k_c = (N-1) - a_{62}(k) = (100-1) - 5 = 94$ шагов, в течение которых каждый абонент будет увеличивать свое значение a_{i2} , пока оно на шаге $(k+94)$ не достигнет максимального значения $a_{52}(k+k_c) = 99$ у абонента 5, после чего абонент 6 понизит свой ранг до уровня автономной синхронизации и волна сброса рангов вновь не дойдет до абонента 5 за 5 шагов ретрансляции.

Таким образом, при возникновении ситуации закливания передачи ЭВ длительность переходного процесса в системе вне зависимости от количества абонентов будет составлять $T_c(N-1)$, что может быть принято при малом N .

Оба метода устранения закливания передачи ЭВ имеют как преимущества, так и недостатки, поэтому выбор метода зависит от конкретной реализации ЛРТС. В рамках настоящей статьи для простоты формального представления принят второй способ.

Последний нерассмотренный ранжирующий признак – "номер ГС". При наличии в системе информации о ЕТВ он должен устанавливаться с учетом равноправия абонентов с признаком $a_{i0} = 0$ и необходимости сохранения кратчайшего маршрута до источника ЕТВ. Определенная ранее функция (4) в качестве номера ГС устанавливает минимальный из номеров присутствующих в системе абонентов, и этот признак имеет больший вес, чем ранжирующие признаки удаленности от ГС и собственного номера абонента. В конфигурации на рис. 2 это может привести к следующей ситуации. Если абонент 5 вместо взаимодействия с абонентом 1 будет взаимодействовать с абонентом 3 и формально выберет его в качестве ЛС, установив $E_5(k+1) = a_{33}(k) = 3$ и $a_{51}(k+1) = 3$, то вслед за ним и абоненты 4 и 2 также установят $a_{41} = a_{21} = 3$, после чего абонент 7 будет вынужден выбрать в качестве ЛС абонента 8, имеющего больший ранг, но меньшую точность синхронизации, чем абонент 2. Указанную ситуацию возможно разрешить, если игнорировать значение признака "номер ГС" при выборе ЛС абонентом с признаком $a_{i0} = 1$.

С учетом этого для условия $\min[A_i^1(k)] = 1$ из выражения (7) получаем номер ЛС – абонента m :

$$E_i(k+1) = a_{m3}(k) = \min(a_{j3}(k) | a_{j2}(k) = \\ = \min(a_{r2}(k) | a_{r0}(k) = \min[A_i^1(k)]),$$

признак $a_{m1}(k)$ которого будет ретранслирован абонентом i на следующем шаге: $a_{i1}(k+1) = a_{m1}(k)$, $m \neq i$. В обратном же случае, соответствующем, как и для (4), потере связи между абонентом i и его ЛС, будет установлено $a_{i1}(k+1) = a_{i3}(k)$.

С учетом изложенного общий вид выражений для вектор-функции \mathbf{F}_R и функции f_E будет зависеть от наличия связи между абонентом и источником ЕТВ в ЛРТС, определяющей уровень синхронизма каждого абонента: глобальный ($SL_i = 0$) – для абонентов, имеющих собственный источник ЕТВ ($UTC_i = 1$); локальный ($SL_i = 1$) – для абонентов, получающих информацию о ЕТВ от абонентов глобального уровня, чему соответствуют признаки $UTC_i = 0$ и $\min[A_i^1(k)] = 1$; автономный ($SL_i = 2$), при котором ни у одного из наблюдаемых абонентов нет синхронизации с ЕТВ, т. е. $UTC_i = 0$ и $\min[A_i^1(k)] = 2$. Необходимо отметить смысловое различие параметра $SL_i(k)$ и ранжирующего признака $a_{i0}(k)$: первый указывает на потенциальную точность синхронизации, определенную на шаге k по результатам оценки матрицы наблюдения $A_i(k)$, второй же служит численным выражением определенного значения "тип источника ЭВ", которое на шаге $k+1$ может измениться, например повыситься при обнаружении источника ЕТВ или понизиться при сбросе ранга.

Результирующий вид функций определения ранга и вычисления ЛС параметрически зависит от значения признака SL_i :

$$E_i(k+1) = f_E[A_i(k)] = \begin{cases} f_{E0}[A_i(k)] = a_{i3}(k), & SL_i = 0; \\ f_{E1}[A_i(k)], & SL_i = 1; \\ f_{E2}[A_i(k)], & SL_i = 2, \end{cases} \quad (8)$$

где

$$f_{E1}[A_i(k)] = \begin{cases} E_i(k), & \mathbb{Z}_{E11}; \\ \min[a_{i3}(k), E_i(k)], & \mathbb{Z}_{E12}; \\ \min[e_i(k) \setminus a_{i3}(k) | a_{j1}(k) = a_{i3}(k)], & \mathbb{Z}_{E11} \wedge \mathbb{Z}_{E12}; \end{cases} \quad (9)$$

$$f_{E2}[A_i(k)] = \begin{cases} \min[a_{i3}(k), E_i(k)], & \mathbb{Z}_{E21}; \\ \min(a_{j3}(k) | a_{j2}(k) = \\ = \min\{a_{r2}(k) | a_{r1}(k) = \min[\frac{A_i^1(k)}{\mathbb{Z}_{E21}}]\}, \end{cases} \quad (10)$$

причем

$$\mathbb{Z}_{E11} = \min[e_i(k) \setminus a_{i3}(k)] = \emptyset; \quad (11)$$

$$\mathbb{Z}_{E12} = [a_{j0}(k) > a_{j0}(k-1)] \wedge [E_i(k-1) = a_{j3}(k-1)] \wedge [E_i(k-1) \neq a_{i3}(k-1)]; \quad (12)$$

$$\mathbb{Z}_{E21} = \{[a_{j1}(k) > a_{j1}(k-1)] \vee [a_{j0}(k) > a_{j0}(k-1)]\} \wedge [E_i(k-1) = a_{j3}(k-1)] \wedge [E_i(k-1) \neq a_{i3}(k-1)] \quad (13)$$

(" \vee " – символ булевой операции "ИЛИ");

$$e_i(k) = a_{j3}(k) [a_{j2}(k) \leq N-1] \wedge (a_{j2}(k) = \min\{a_{r2}(k) | a_{n0} = \min[A_i^1(k)]\}); \quad (14)$$

$$\mathbf{F}_R : \begin{cases} a_{i0}(k+1) = f_0[A_i(k)]; \\ a_{i1}(k+1) = f_1[A_i(k)]; \\ a_{i2}(k+1) = f_2[A_i(k)]; \\ a_{i3}(k+1) = f_3[A_i(k)]; \end{cases} \quad (15)$$

где

$$f_0[A_i(k)] = \begin{cases} 0, & SL_i(k) = 0; \\ f_{01}[A_i(k)], & SL_i(k) = 1; \\ 2, & SL_i(k) = 2; \end{cases} \quad (16)$$

$$f_1[A_i(k)] = \begin{cases} a_{i3}(k), & \mathbb{Z}_{R11}; \\ a_{j1}(k), & \mathbb{Z}_{R12}; \\ f_{12}[A_i(k)], & SL_i(k) = 2; \end{cases} \quad (17)$$

$$f_2[A_i(k)] = \begin{cases} 0, & E_i(k+1) = a_{i3}(k); \\ a_{j2}(k) + 1, & E_i(k+1) = a_{j3}(k); \\ f_3[A_i(k)] = a_{i3}(k), \end{cases} \quad (18)$$

причем

$$f_{01}[A_i(k)] = \begin{cases} 2, & E_i(k+1) = a_{i3}(k); \\ a_{j1}(k), & E_i(k+1) = a_{j3}(k); \end{cases} \quad (19)$$

$$\mathbb{Z}_{R11} = [SL_i(k) = 0] \vee [E_i(k+1) = a_{i3}(k)]; \quad (20)$$

$$\mathbb{Z}_{R12} = [SL_i(k) = 1] \wedge [E_i(k+1) = a_{j3}(k)]; \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
 f_{12}[A_i(k)] &= \\
 &= \begin{cases} a_{i3}(k), \mathbb{Z}_{1,2,1}; \\ \min\{a_{i3}(k), E_i(k)\}, \mathbb{Z}_{1,2,2}; \\ \min\{A_i^1(k) \setminus a_{j1}(k) = a_{i1}(k-1)\}, \mathbb{Z}_{1,2,3}; \\ \min\{A_i^1(k)\}, \overline{\mathbb{Z}_{1,2,1}} \wedge \overline{\mathbb{Z}_{1,2,2}} \wedge \overline{\mathbb{Z}_{1,2,3}}, \end{cases} \quad (22) \\
 \mathbb{Z}_{1,2} &= \\
 &= [E_i(k+1) = a_{i3}(k)] \wedge [a_{i1}(k) < a_{i3}(k)]; \quad (23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbb{Z}_{1,2,2} &= \left\{ [a_{j1}(k) > a_{j1}(k-1)] \vee \right. \\
 &\quad \left. \vee [a_{j0}(k) > a_{j0}(k-1)] \right\} \wedge \\
 &\quad \wedge [E_i(k-1) = a_{j3}(k-1)] \wedge \\
 &\quad \wedge [E_i(k-1) \neq a_{i3}(k-1)]; \quad (24) \\
 \mathbb{Z}_{1,2,3} &= a_{i1}(k) > a_{i1}(k-1). \quad (25)
 \end{aligned}$$

Комплекс функций (8)–(25) обеспечивает устойчивую работу группы переменного количества абонентов, имеющих непостоянную структуру связей как между собой, так и с источником ЕТВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов В. К., Герчиков А. Г., Чернявский А. Г. Локальные радиотехнические системы межсамолетной навигации. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2011. 123 с.
2. Принципы построения локальной радиотехнической системы межсамолетной навигации / В. И. Бабуров, А. Г. Герчиков, В. К. Орлов, А. Г. Чернявский // Радиотехника. 2012. № 7. С. 27–31.
3. О синхронизации в радиотехнических системах информационного обмена и наблюдения / В. И. Бабуров, А. Г. Герчиков, Д. А. Наливайко, В. К. Орлов, А. Г. Чернявский // Транспорт: Наука, техника, управление. 2001. № 8. С. 23–26.
4. Герчиков А. Г., Липаков Н. Е., Орлов В. К. Организация ранговой синхронизации в локальных радиотех-

- нических системах межсамолетной навигации // Вестн. конц. ПВО "Алмаз-Антей". 2014. № 2(6). С. 102–108.
5. Герчиков А. Г., Липаков Н. Е., Орлов В. К. Ранговая синхронизация при реконфигурации группы абонентов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. Вып. 4. С. 26–31.
6. Информационные технологии в радиотехнических системах: учеб. пособие. 2-е изд. / В. А. Васин, И. Б. Власов, Ю. М. Егоров и др.; под ред. И. Б. Федорова. М.: Изд-во МГТУ им. И. Э. Баумана, 2004. 768 с.
7. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.

N. E. Lipakov
JSC "VNIIRA" (Saint Petersburg)

Application of Universal Time Coordinated if Rank-Synchronization System of Mobile Units

The aim is to analyze principles of construction inter-aircraft navigation system with using in the rank-synchronization subsystem both of autonomous ant universal coordinated time. As result offered the improved work algorithm of rank-synchronization subsystem, providing interaction of user group under unstable connection with universal time coordinated source.

Inter-aircraft navigation, rank synchronization, ranked magnitude, universal time coordinated

Статья поступила в редакцию 5 мая 2016 г.