

УДК 621.396.933

А. Г. Герчиков, Н. Е. Липаков
 АО "Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры"
 (Санкт-Петербург)

В. К. Орлов
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический
 университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Ранговая синхронизация при реконфигурации группы абонентов

Рассмотрены переходные процессы в подсистеме ранговой синхронизации абонентов системы межсамолетной навигации с временным разделением работы при различных вариантах изменения структуры графа связей между абонентами. Проанализированы варианты улучшения алгоритма ранговой синхронизации, обеспечивающие конечность переходных процессов в системе в случае выхода глобального синхронизатора из группы.

Межсамолетная навигация, множественный доступ с временным разделением, граф связей, ранговая синхронизация, ранжирующие признаки, переходный процесс

Основные принципы построения локальных радиотехнических систем межсамолетной навигации (ЛРТС МСН), изложенные в [1]–[3], определяют необходимость наличия в них подсистемы ранговой синхронизации (ПРС) абонентов, работающих с временным разделением доступа к единому частотному каналу связи. Прежде чем приступить к анализу работы ПРС при изменении числа связей между абонентами, кратко изложим основные принципы ее работы.

В основе работы ПРС лежит понятие ранга – уникальной количественной характеристики абонента, позволяющей распределить между абонентами рабочие интервалы. Указанное распределение осуществляется подстройкой бортовых часов синхронизируемых абонентов под источник эталонного времени (ЭВ), которым является абонент с "наивысшим" рангом – глобальный синхронизатор (ГС). Временная шкала ГС рассматривается прочими абонентами как эталонное время, которое передается по сети от ГС прочим абонентам, каждый из которых может быть локальным синхронизатором (ЛС), если он ретранслирует ЭВ другим абонентам. Необходимость организации ранговой синхронизации между абонентами и введения понятий ГС и ЛС проистекает из случайного расположения абонентов в навигационном пространстве, при котором может отсутствовать прямое взаимодействие между некоторыми абонентами системы (рис. 1) [3]. На рис. 1 в группе из шести абонентов абонент с условным номером 1 выступает в роли ГС, абоненты 2, 3, 4 – ЛС, а абон-

ненты 5 и 6 – ведомые. Линиями без стрелок на рис. 1 показаны связи между абонентами, а линиями со стрелками – направления передачи ЭВ. Множество связей образует случайный граф связей, а множество направлений передачи ЭВ – направленное дерево передачи (НДП).

Для выработки рангов и определения ГС абоненты системы обмениваются служебной информацией в виде набора ранжирующих признаков $a_{i,s}$ ($i \in \overline{1, n}$ – номер абонента; $s \in \overline{1, m}$ – номер признака), образующих минимально необходимый набор [3]: $C_i = [a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,3}]$, где $a_{i,1}$ – номер ГС; $a_{i,2}$ – удаленность от ретранслятора; $a_{i,3}$ – собственный номер абонента. Тогда ранг определяется функцией

$$R_i = f_C(C_i) = \sum_{s=1}^m a_{i,s} b^{m-s}, \quad (1)$$

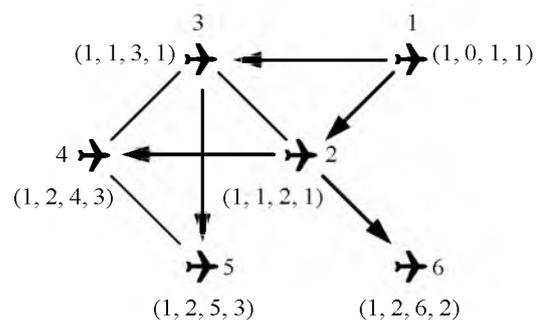


Рис. 1

где $b > a_{i,s}$ для любых значений i и s – основные системы вычисления ранга.

Каждый i -й абонент, получая от взаимодействующего с ним множества абонентов¹ наборы ранжирующих признаков C_j , сравнивает свой набор C_i с полученными, образующими на шаге k матрицу наблюдения A_i :

$$A_i(k) = [C_1^T(k) \dots C_n^T(k)]^T = \begin{bmatrix} a_{1,1}(k) & a_{1,2}(k) & a_{1,3}(k) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n,1}(k) & a_{n,2}(k) & a_{n,3}(k) \end{bmatrix},$$

("T" – символ транспонирования).

С помощью обобщенной вектор-функции вычисления ранга

$$F_R : \begin{cases} a_{i,1}(k+1) = f_1[A_i(k)] = \min\{A_i^1(k)\}; \\ a_{i,2}(k+1) = f_2[A_i(k)] = \\ = \min\{a_{j,2}(k) | a_{j,1}(k)\} = \\ = \min\{A_i^1(k)\} + 1; \\ a_{i,3}(k+1) = f_3[A_i(k)] = a_{i,3}(k) \end{cases} \quad (2)$$

($f_s, s \in \overline{1, 3}$ – обобщенная функция связи между матрицей A_i и признаком $a_{i,s}$; $A_i^1(k)$ – первый столбец (вектор) матрицы наблюдения на k -м шаге; "|" – символ условия, указанного справа от символа, которое выполняется для выражения, стоящего слева от него) на шаге $(k+1)$ определяется набор ранжирующих признаков:

$$C_i(k+1) = [a_{i,1}(k+1), a_{i,2}(k+1), a_{i,3}(k+1)]. \quad (3)$$

Ранг $R_i(k+1)$ i -го абонента на этом шаге вычисляется из (3) с помощью (1). В качестве ЛС выбирается абонент с номером E_i , вычисленным с помощью функции

$$E_i(k+1) = f_E[A_i(k)] = \min(a_{j,3}(k) | a_{j,2}(k)) = \min\{a_{r,2}(k) | a_{r,1}(k) = \min\{A_i^1(k)\}\}. \quad (4)$$

¹ В условиях неполной видимости, когда между некоторыми абонентами системы может устойчиво отсутствовать связь, эти множества, а следовательно, и матрицы наблюдения будут в общем случае для каждого абонента различными.

В результате:

- с помощью функции f_1 (2) из множества наблюдаемых абонентов будет определен наименьший номер ГС, передаваемый абонентом в качестве собственного ранжирующего признака $a_{i,1}$ на шаге $(k+1)$;

- с помощью функции f_2 из множества наблюдаемых абонентов, у которых номер ГС равен минимальному, определяется абонент, наименее удаленный от ГС, и его собственный признак удаленности от ГС, передаваемый абонентом в качестве собственного ранжирующего признака $a_{i,2}$ на шаге $(k+1)$, устанавливается на единицу больше определенного;

- с помощью функции f_3 из множества наблюдаемых абонентов, у которых номера ГС и удаленность минимальны, в качестве ЛС выбирается абонент с наименьшим собственным номером, причем ранжирующий признак $a_{i,3}$, передаваемый им на шаге $(k+1)$, не изменяется.

Для каждого абонента набор ранжирующих признаков C_i и номер ЛС E_i образуют вектор состояния $(C_i, E_i) = (a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,3}, E_i)$, определяющий его положение в структуре НДП ЭВ. На рис. 1 векторы состояния абонентов приведены в скобках.

Изложенные принципы функционирования ПРС однозначно определяют порядок первоначального объединения некоторого числа абонентов во взаимодействующую группу, но не учитывают эффекты, которые могут возникать при изменении числа связей (реконфигурации) между абонентами группы. Возможными вариантами такой реконфигурации являются присоединение к группе одного или нескольких абонентов, пропадание существующих или появление новых связей при неизменном числе абонентов, выход из группы одного или нескольких абонентов, а также различные сочетания таких ситуаций. При реконфигурации на некотором шаге k_0 работы системы возникает несоответствие между выработанными к этому моменту величинами $C_i(k_0)$ и $E_i(k_0)$, которые можно рассматривать как начальные условия работы ПРС (положив $k_0 = 0$), и вновь образованной структурой НДП, исходя из которой каждый абонент должен выработать величины $C'_i = [a'_{i,1}, a'_{i,2}, a'_{i,3}]$ и E'_i . Следует отметить, что выбор функций F_R и f_E должен обеспечить

печивать для каждого абонента преобразования $C_i(k) \rightarrow C'_i$ и $E_i(k) \rightarrow E'_i$ за конечное число шагов переходного процесса k_t при $k \rightarrow k_0 + k_t = k_t$.

Рассмотрим простой пример реконфигурации для НДП (см. рис. 1). Пусть между абонентами 1 и 3 пропала связь (далее связи между абонентами обозначены по типу 1→3) (рис. 2). Преобразование вектора состояния для реконфигурируемых абонентов обозначим

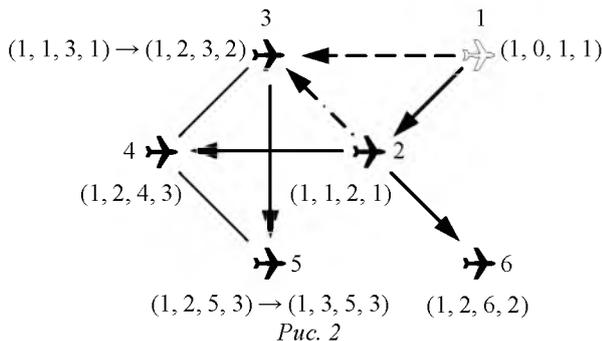
$$(a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,3}, E_i) \rightarrow (a'_{i,1}, a'_{i,2}, a'_{i,3}, E'_i).$$

Из рис. 2 следует, что в НДП вместо пути передачи ЭВ 1→3→5 возникает новый путь 1→2→3→5 и абоненты 3 и 5 вырабатывают новые величины C_i и E_i :

– на шаге $k=1$ абонент 3 выбирает в качестве ЛС абонент 2 [$E_3(1)=2$], и возникает новое направление передачи ЭВ 2→3, вследствие чего изменяется ранг абонента 3 за счет увеличения его удаленности от ГС; при этом $C'_3(1)=[1, 2, 3]$;

– на шаге $k=2$ абонент 5, не меняя свой ЛС [$E_5(2)=3$], вырабатывает новый ранг, также увеличивая удаленность от ГС; при этом $C'_5(2)=[1, 3, 5]$.

Остальные абоненты группы в рассматриваемом случае в процессе перестройки не участвуют. Приведенный пример показывает, что минимальная длительность переходного процесса в ПРС определяется длиной наибольшего участка среди всех вновь образованных путей в НДП, на котором будет проходить смена рангов. Для приведенного примера – это участок 2→3→5 пути 1→2→3→5 (на участке 1→2 реконфигурации не происходит), передача ЭВ на котором от абонента 1 до абонента 5 выполняется за два шага. Вторым выводом является то, что функции (2) и (4) обеспечивают устойчивую работу ПРС при изменении числа связей в группе.



Полученные выводы справедливы и для других вариантов реконфигурации, схожих с приведенным, а именно:

- появления новых связей в группе абонентов;
- выхода абонента из группы, что равносильно пропаданию всех его связей с другими абонентами, а также выходу из группы нескольких абонентов при условии сохранения полной связности группы;
- присоединения к группе одного или нескольких абонентов.

В каждой из указанных ситуаций в графе связей абонентов будет формироваться новая структура распространения ЭВ, длина которой от ГС до самого удаленного абонента будет определять длительность переходных процессов в ПРС.

Однако функции вида (2) и (4) оказываются непригодными для работы в одном исключительном случае: при выходе из работы ГС – абонента с наименьшим номером. В первую очередь это определяется тем, что функция f_1 в (2) позволяет изменить номер ГС только в сторону уменьшения. Эта ситуация равносильна присоединению к группе из n абонентов с собственными номерами $a_{1,3}, \dots, a_{n,3}$ абонента $(n+1)$ с собственным номером $a_{n+1,3} < a_{3, \min} = \min\{a_{1,3}, \dots, a_{n,3}\}$. Действительно, поскольку для всех абонентов группы $a_{i,1} = a_{3, \min}, i \in \overline{1, n}$ (а новый абонент имеет номер ГС $a_{n+1,1} = a_{n+1,3} < a_{i,1} = a_{3, \min}, i \in \overline{1, n}$) применение функции f_1 даст следующий результат:

$$f_1(A_i) = a_{i,1} = \min\{a_{1,3}, \dots, a_{n,3}, a_{n+1,3}\} = a_{n+1,3}, i \in \overline{1, n+1},$$

вследствие чего присоединяющийся абонент станет новым ГС. Если же рассматривать обратный случай, в котором некоторый абонент j (ГС с собственным номером $a_{j,3} = \min\{a_{1,3}, \dots, a_{n,3}\}, i \in \overline{1, n}$) покидает группу, в которой каждый абонент уже обладает ранжирующим признаком $a_{i,1} = a_{j,3}, i \in \overline{1, n}$, то результат действия функции f_1 останется равным $a_{j,3}$ на любом шаге k для любого абонента вместо того, чтобы принять значение, равное наименьшему из оставшихся собственных номеров:

$$a_{i,3} = \min\{a_{1,3}, \dots, a_{n,3} \setminus a_{j,3}\},$$

где "\" – символ исключения элемента из множества.

Процесс реконфигурации в случае выхода ГС из группы рассмотрим на примере группы абонентов (рис. 3), в которой пропадает связь 1→5. Значения величин C_i и E_i для оставшихся абонентов группы, рассчитанные с помощью (2) и (4) для шагов 1–4 реконфигурации, представлены в табл. 1, из которой следует:

- на шаге $k = 3$ образуется устойчивая структура НДП ЭВ;
- новым ГС группы становится абонент 2, поскольку он имеет наименьший номер;
- все абоненты по-прежнему сохраняют ранжирующий признак $a_{j,1} = 1$;

– признак удаленности абонентов от ГС, определяемый функцией f_2 , неограниченно возрастает у всех абонентов, что не соответствует получившейся структуре НДП ЭВ, характеризуемой признаками $a_{2,2} = 0$; $a_{3,2} = a_{4,2} = 1$; $a_{5,2} = 2$.

Причиной является то, что каждый абонент, выбравший самого себя в качестве ЛС (на шаге 1 – абонент 5, на шаге 2 – абонент 3, на шаге 3 и далее – абонент 2), рассчитывает получившуюся удаленность от ГС как $a_{i,2}(k+1) = a_{i,2}(k) + 1$, что и порождает неограниченное возрастание признака.

Для устранения выявленных ошибок в работе ПРС необходимо изменить вектор-функцию F_R следующим образом. На первом шаге абонент, потерявший взаимодействие со своим ЛС, определяет с помощью f_E новый номер своего ЛС и сравнивает его с собственным номером. Если при этом $E_i(k+1) = a_{i,3}(k)$ (абонент полагает свой ранг наивысшим, выбирая себя в качестве ЛС), то либо он является ГС [$a_{i,1}(k) = a_{i,3}(k)$], либо

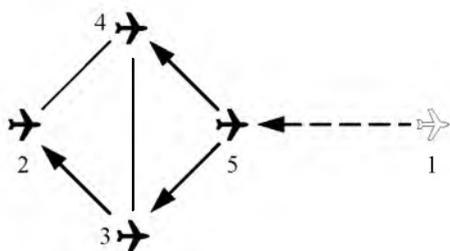


Рис. 3

Таблица 1

k	$C_2(k)$	E_2	$C_3(k)$	E_3	$C_4(k)$	E_4	$C_5(k)$	E_5
0	[1, 3, 2]	3	[1, 2, 3]	5	[1, 2, 4]	5	[1, 1, 5]	1
1	[1, 3, 2]	3	[1, 2, 3]	5	[1, 2, 4]	5	[1, 2, 5]	5
2	[1, 3, 2]	3	[1, 3, 3]	3	[1, 3, 4]	3	[1, 3, 5]	3
3	[1, 4, 2]	2	[1, 4, 3]	2	[1, 4, 4]	2	[1, 4, 5]	3
4	[1, 5, 2]	2	[1, 5, 3]	2	[1, 5, 4]	2	[1, 5, 5]	3

обладает рангом, полученным от другого абонента [$a_{i,1}(k) < a_{i,3}(k)$]. Во втором случае абонент

должен принудительно установить $a_{i,1}(k+1) = a_{i,3}(k)$ и $a_{i,2}(k+1) = 0$, откуда для условия

$$[E_i(k+1) = a_{i,3}(k)] \& [a_{i,1}(k) < a_{i,3}(k)]$$

можно записать:

$$a_{i,1}(k+1) = a_{i,3}(k); \tag{5}$$

$$a_{i,2}(k+1) = 0. \tag{6}$$

При этом значение $E_i(k+1)$ по-прежнему определяется выражением (4).

На последующих шагах все абоненты с номером ЛС $f_E[A_i(k)] = a_{j,3} \neq a_{i,3}(k)$, вычисленным с помощью (4), получающие ЭВ от абонента j , должны понижать свой ранг вслед за своим ЛС, у которого $a_{j,1}(k) > a_{j,1}(k-1)$. Для указанного условия будут действовать следующие выражения, определяемые соотношением между собственным номером абонента и номером ЛС $a_{j,3}(k-1) = E_i(k)$:

$$a_{i,1}(k+1) = \min[a_{i,3}(k), E_i(k)], \tag{7}$$

$$a_{i,2}(k+1) = \begin{cases} 0, & a_{i,1}(k+1) = a_{i,3}(k); \\ a_{j,2}(k)+1, & a_{i,1}(k+1) = \\ & = a_{j,1}(k) \big| a_{j,3}(k-1) = \\ & = E_i(k), \end{cases} \tag{8}$$

а собственный номер будет оставаться неизменным: $a_{i,3}(k+1) = a_{i,3}(k)$. При этом расчет номера ЛС для шага $(k+1)$ будет выполняться не по (4), а с помощью выражения

$$E_i(k+1) = \min[a_{i,3}(k), E_i(k)], \tag{9}$$

совпадающего с выражением, определяющим признак $a_{i,1}(k+1)$.

Выражения (5)–(8) поясним на примере, показанном на рис. 3. На первом шаге абонент 5, потеряв взаимодействие с 1, принудительно установит $a_{5,1} = 5$ и $a_{5,2} = 0$. На втором шаге абонент 3, обнаружив, что его ЛС 5 понизил ранг, не установит вслед за ним $a_{3,1} = 5$, а выберет себя в качестве ЛС ($E_3 = 3$) и установит $a_{3,1} = 3$. Аналогично будет действовать и абонент 4. На третьем шаге

волна сброса ранга дойдет до абонента 2, который также выработает новый вектор $C_2 = [2, 0, 2]$ и установит $E_2 = 2$. Кроме того, в процессе реконфигурации должно быть учтено, что абонент, понизивший свой ранг (например абонент 5 на шаге 1 в рассматриваемом примере), на этом же шаге получит в матрице наблюдения информацию о более высоком ранге следующих за ним абонентов (абоненты 3 и 4), еще не успевших понизить свой ранг. Для того чтобы абонент 5 снова не установил $a_{5,1} = 1$, необходимо ввести задержку в процедуре повышения ранга как минимум в один шаг, за который абоненты 3 и 4 также перестанут передавать номер своего ГС, равный единице. Для этого необходимо при условии $a_{i,1}(k) > a_{i,1}(k-1)$ исключить на данном шаге из матрицы наблюдения все абоненты с номером ГС, равным номеру ГС абонента на предыдущем шаге:

$$a_{i,1}(k+1) = \min\{A_i^1(k) \setminus a_{j,1}(k) = a_{i,1}(k-1)\}, \quad (10)$$

а значение $a_{i,2}(k+1)$ при этом вычислить из (2). В результате для понизившего свой ранг абонента с некоторым значением $a_{i,2}$ из рассмотрения на шаге понижения ранга будут исключены все следующие за ним абоненты со значениями $a_{j,2} = a_{i,2} + 1$, которые на последующих шагах не будут увеличивать значение признака $a_{i,1}$, только если они получают ЭВ от ГС, который не вышел из группы полностью, а лишь потерял связь с некоторыми абонентами. К примеру, если на рис. 3 абонент 1 прекратит взаимодействие с абонентом 5 и при этом начнет взаимодействовать с абонентом 2, то волна понижения рангов от абонента 5 будет остановлена встречной волной распространения новых рангов от абонента 1 по маршрутам $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 5$ и $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4$.

Обобщив выражения (2), (4) и (5)–(10), запишем итоговые выражения для функции f_E :

$$f_E: E_i(k+1) = \begin{cases} \min[a_{i,3}(k), E_i(k)], a_{j,1}(k) > a_{j,1}(k-1); \\ \min(a_{j,3}(k) | a_{j,2}(k) = \\ = \min\{a_{r,2}(k) | a_{r,1}(k) = \min[A_i^1(k)]\}, \\ a_{j,1}(k) \leq a_{j,1}(k-1) \end{cases} \quad (11)$$

и вектор-функции F_R :

$$a_{i,1}(k+1) = \begin{cases} a_{i,3}(k), \\ [E_i(k+1) = a_{i,3}(k)] \& [a_{i,1}(k) < a_{i,3}(k)]; \\ \min\{a_{i,3}(k), E_i(k)\}, \\ a_{j,1}(k) > a_{j,1}(k-1) | E_i(k) = a_{j,3}(k-1); \\ \min\{A_i^1(k) \setminus a_{j,1}(k) = a_{i,1}(k-1)\}, \\ a_{i,1}(k) > a_{i,1}(k-1); \\ \min\{A_i^1(k)\}, \text{ otherwise;} \end{cases} \quad (12)$$

$$a_{i,2}(k+1) = \begin{cases} 0, \\ [E_i(k+1) = a_{i,3}(k)] \& \\ \& [a_{i,1}(k) < a_{i,3}(k)]; \\ 0, \\ [a_{j,1}(k) > a_{j,1}(k-1)] \& \\ \& [a_{i,1}(k+1) = a_{i,3}(k)]; \\ a_{j,2}(k) + 1, \\ [a_{i,1}(k+1) = a_{j,1}(k) | a_{j,3}(k-1) = E_i(k)] \wedge \\ \wedge [a_{j,1}(k) > a_{j,1}(k-1)]; \\ \min\{a_{j,2}(k) | a_{j,1}(k) = \min[A_i^1(k)]\} + 1, \\ \text{ otherwise;} \end{cases} \quad (13)$$

$$a_{i,3}(k+1) = a_{i,2}(k), \quad (14)$$

где "otherwise" обозначает все прочие случаи.

Следует отметить, что функции (11)–(14), в отличие от (2) и (4), используют в качестве аргумента не только матрицу наблюдения на текущем шаге $A_i(k)$, но и матрицу наблюдения, полученную на предыдущем шаге $A_i(k-1)$.

Для группы абонентов, приведенных на рис. 3, переходные процессы, рассчитанные с помощью (11)–(14), представлены в табл. 2, откуда видно, что

Таблица 2

k	$C_2(k)$	E_2	$C_3(k)$	E_3	$C_4(k)$	E_4	$C_5(k)$	E_5
0	[1, 3, 2]	3	[1, 2, 3]	5	[1, 2, 4]	5	[1, 1, 5]	1
1	[1, 3, 2]	3	[1, 2, 3]	5	[1, 2, 4]	5	[5, 0, 5]	5
2	[1, 3, 2]	3	[3, 0, 3]	3	[4, 0, 4]	4	[5, 0, 5]	5
3	[2, 0, 2]	2	[3, 0, 3]	3	[3, 1, 4]	3	[3, 1, 5]	3
4	[2, 0, 2]	2	[2, 1, 3]	2	[2, 1, 4]	2	[3, 1, 5]	3
5	[2, 0, 2]	2	[2, 1, 3]	2	[2, 1, 4]	2	[2, 2, 5]	3
6	[2, 0, 2]	2	[2, 1, 3]	2	[2, 1, 4]	2	[2, 2, 5]	3

на шаге $k = 5$ система достигает устойчивого состояния, и переходные процессы в ПРС заканчиваются.

Рассмотренные примеры реконфигурации абонентов показывают, что модифицированные функции определения ранжирующих признаков абонента F_R (12)–(14) и вычисления номера ло-

кального синхронизатора f_E (11) обеспечивают устойчивую работу ПРС, сохраняя локальную сеть ЭВ и конечное время переходных процессов при различных вариантах входа абонентов в группу и выхода из нее.

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. Бабу-

ров, А. Г. Герчиков, В. К. Орлов, А. Г. Чернявский // Радиотехника. 2012. № 7. С. 27–30.

3. Герчиков А. Г., Липаков Н. Е., Орлов В. К. Организация ранговой синхронизации в локальных радиотехнических системах межсамолетной навигации // Вестн. конц. ПВО "Алмаз-Антей". 2014. № 2 (8). С. 102–108.

A. G. Gerchikov, N. E. Lipakov
JSC "VNIIRA" (Saint Peterburg)

V. K. Orlov
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Rank synchronization under reconfiguration of user group

The aim is to analyze transients in inter-aircraft navigation system with hierarchical timing that comprises the sequential rank override that determines access sequence to a single communication channel. On the analysis of specific cases of changing the structure of user connections (reconfigurations) refined rank calculation function and local synchronizing user select function at each step of work. As result the transients gain finiteness that provides the mobile units collaboration stability under the reconfiguration.

Inter-aircraft navigation, timed division multiple access, communication graph, rank synchronization, ranked magnitude, transient

Статья поступила в редакцию 31 августа 2015 г.