

## **АДАПТИВНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СВЧ СИСТЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

д.т.н. С.В. Козелков, А.Н. Загорулько

*Предложен адаптивный алгоритм синхронизации СВЧ радиосистем по информационному сигналу, позволяющий ускорить вхождение в связь без снижения при этом точности синхронизации и без введения избыточности по энергетике «синхроканала».*

Известно, что с повышением скорости передачи информации по радиоканалам реальная эффективность применения известных методов разрешения противоречия между точностными и динамическими характеристиками систем синхронизации линий связи быстро снижается. В частности, требуемое для высокоскоростных связных радиолиний повышение быстродействия систем синхронизации в настоящее время обычно обеспечивается путем увеличения избыточности по мощности синхросигнала (по сравнению с установившимся режимом), что приводит к ухудшению энергетических характеристик данных радиолиний. Поэтому целью статьи является разработка нового и в максимальной степени свободного от указанных выше недостатков методов повышения интегральной эффективности весьма важного и перспективного класса систем синхронизации линий связи по информационному сигналу.

Отметим прежде всего то обстоятельство, что информация, принятая при наличии синхронизации, претерпевает существенные искажения и, как правило, необратимо утрачивается (1 - 4). Более того, появление (вследствие «срыва» тактовой и/или высокочастотной синхронизации) длинной серии ошибочных символов может в ряде случаев приводить к нарушениям цикловой (кадровой) синхронизации и, следовательно, к долговременным перерывам в связи (2). Отсюда следует вывод о целесообразности разработки и применения адаптивных алгоритмов организации процесса синхронизации, предполагающих использование полной мощности информационного сигнала для ускоренного установления (восстановления) состояния синхронизма с целью сокращения необратимых потерь полезной информации и повышения надежности связи. Учитывая специфику приёмников СВЧ диапазона волн, где уровень шумов определяется преимущественно местными аппаратурными флуктуациями (4), представляется целесообразным изменять энергетiku «синхроканала» при переходах от режима захвата к режиму удержания и обратно.

При этом формальная математическая запись искомого адаптивного алгоритма синхронизации может быть представлена в виде:

$$\left. \begin{aligned} U_{\text{вых Ф D}_2} < U_{\text{П}}, &\Rightarrow \left( \begin{array}{l} "C_{\text{T}}" \div 1/\beta; "И" \div (\beta-1)/\beta \\ "C_{\text{Г}}" \div 0 \end{array} \right) \\ U_{\text{вых Ф D}_2} \geq U_{\text{П}}, &\Rightarrow \left( \begin{array}{l} "C_{\text{T}}" \div 1/\beta; "C_{\text{Г}}" \div (\beta-1)/\beta \\ "И" \div 0 \end{array} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $U_{\text{вых Ф D}_2}$  – напряжение на выходе внутреннего кольца точной синхронизации;  $U_{\text{П}}$  – пороговое значение  $U_{\text{вых Ф D}_2}$ , характеризующее наличие (при  $U_{\text{вых Ф D}_2} < U_{\text{П}}$ ) или отсутствие (при  $U_{\text{вых Ф D}_2} \geq U_{\text{П}}$ ) состояния точного синхронизма, т.е. режима точного удержания во внутреннем кольце; "И"; "C<sub>T</sub>"; "C<sub>Г</sub>" – обозначения информационного канала, а также точного и грубого «синхроканалов» соответственно; верхняя строка в круглых скобках выражения (1) указывает рабочие (в данный момент времени) каналы, а нижняя строка означает неработающий в это время канал приёмника сигналов; величина, отделенная знаком ( $\div$ ) характеризует энергетику (т.е. отводимую часть полной мощности информационного сигнала) соответствующего канала приёмника сигналов.

При этом ускорение процессов установления (и восстановления) состояния синхронизма путем использования в грубом «синхроканале» приёмника той доли  $(\beta-1)/\beta$  мощности сигнала, которая в стационарном состоянии синхронизма служит для выделения в информационном канале приёмника полезных сообщений. Таким образом, информационный канал и грубый «синхроканал» приёмника одновременно функционировать не могут, в то время как его точный «синхроканал» работает постоянно – для обеспечения процессов извлечения информации и с целью контроля наличия состояния синхронизма (в режиме удержания), либо только для решения последней задачи (в режиме захвата).

Оценим эффективность применения предложенного адаптивного алгоритма синхронизации связной радиолинии. В качестве критерия используем интегральный показатель качества  $E_{\text{эфф}}$  – эффективную энергетическую цену передачи единицы информации, позволяющую осуществить одновременный и компактный учет как точностных и динамических характеристик, так и энергетических параметров систем синхронизации. Считая при этом заданными качество синхронизации линии и комплекса линий связи, запишем следующее выражение для определения величины  $E_{\text{эфф}}$ :

$$E_{\text{эфф}} = E_{\text{И}} T_{\text{C}} / \left( T_{\text{C}} - T_{\Sigma} (1 + K_{\text{Н}}^{-1}) \right) + q K_{\text{Р}} E_{\text{с}}, \quad (2)$$

где  $E_H$  и  $E_C$  – реальная энергетическая цена передачи единицы соответственно полезной информации и синхросигнала, причём различие величин  $E_H$  и  $E_C$  обусловлено спецификой информационного канала и «синхроканала»;  $T_C$  – длительность сеанса связи;  $T_\Sigma$  – среднее время вхождения в синхронизм;  $q$  – коэффициент, равный отношению переданного за сеанс связи объёма синхросигнала к объёму полезной информации, переданному за тот же интервал времени (в качестве мажоритарной оценки значения величины  $q$  может служить отношение пропускных способностей «синхроканала» и информационного канала с учетом степени их практического использования);  $K_p$  – коэффициент, характеризующий запас по мощности синхросигнала – по сравнению с минимально необходимым для заданного качества синхронизации уровнем (данный запас может создаваться, например, для повышения функциональной надежности синхронизации; с целью обеспечения ускоренного вхождения в синхронизм и т. п.),  $K_p \geq 1$ ;  $K_H$  – коэффициент, характеризующий надёжность синхронизации и равный среднему числу срывов синхронизации за сеанс связи.

Используя тогда формулу (2) можно показать, что повышение интегральной эффективности систем синхронизации обеспечивается путем уменьшения временных затрат  $T_\Sigma$  на установление (и восстановление) синхронизма за счет применения для этих целей энергии информационного сигнала, практически бесполезного во время переходных процессов в указанных выше системах. При этом одновременно снижается величина требуемой избыточности по энергии синхросигнала для установившихся периодов функционирования систем синхронизации, т.е.  $K_p \downarrow$  (а в ряде случаев полностью устраняется необходимость введения этой избыточности, т.е.  $K_p \rightarrow K_{pmin} = 1$ ), что также обеспечивает дополнительный выигрыш в эффективности данных систем.

На рис. 1 представлена обобщенная функциональная схема адаптивной (точнее – самоорганизующейся) системы синхронизации, реализующей указанный выше алгоритм. Здесь УВСС – устройство выделения синхросигнала; СУ – согласующее устройство; ФД – фазовый детектор; ФНЧ – фильтр нижних частот; УНЧ – усилитель низкой частоты; УПТ – усилитель постоянного тока; КС – коммутатор сигналов; У – усилитель; ГУН – генератор, управляемый напряжением; ГПС – генератор поискового сигнала; ИЗ – индикатор захвата; ДМ – делитель мощности; К – ключ; СП – синхронный приемник; подстрочные символы «г» и «т» обозначают принадлежность соответствующего функционального элемента к «грубому» (внешнему быстродействующему) или к «точному» (внутреннему инерционному) кольцу АПЧ.

Внешние и внутренние кольца синхронизации обычно строятся на базе схем ФАП. При этом наличие фильтра (ФНЧг), а в ряде случаев и

усилителя (УНЧг) для внешнего быстродействующего кольца ФАП не является принципиально необходимым. Дополнительные возможности разрешения противоречия между точностными и динамическими характеристиками предлагаемой адаптивной системы синхронизации связаны с введением в её внешнее кольцо дополнительной схемы поиска – см. обозначенные штриховыми линиями элементы и связи.

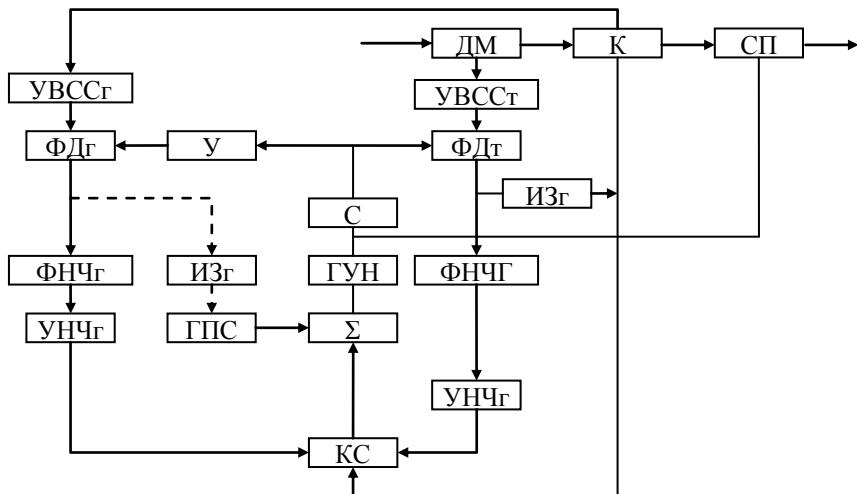


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема адаптивной системы синхронизации

Оценим реальную эффективность применения предлагаемой адаптивной системы синхронизации. Применение для этой цели выражения (2) предполагает определение величин  $T_{\Sigma}$  и  $K_p$ , общие формулы для нахождения которых при отсутствии (\*) или величин (#) схемы поиска во внешнем кольце ФАП имеют соответственно следующий вид:

$$T_{\Sigma}^* = T_{f_1}^* + T_{\varphi_1}^* + T_{\varphi_2}^* = \frac{0,875\gamma_1^*}{\Delta f_{ш1}^*} + \frac{\ln(2\alpha_1^*)}{\Delta f_{ш1}^*} + \frac{1}{\alpha_1^*} \cdot \frac{\ln(2\alpha_2)}{\Delta f_{ш2}}; \quad (3)$$

$$K_p^* = \frac{\alpha_2^*}{\alpha_2} = \frac{\alpha_1^* \Delta f_{ш1}^*}{\alpha_2 \Delta f_{ш2}} \cdot \frac{1}{(\beta-1)} = \frac{\alpha_1^*}{\alpha_2} \cdot \frac{2}{\sqrt{\gamma_1^*}} \cdot \frac{\Delta f_{исх}}{\Delta f_{ш2}} \cdot \frac{1}{(\beta-1)}; \quad (4)$$

$$T_{\Sigma}^{\#} = T_{\text{поиск}}^{\#} + T_{f_1}^{\#} + T_{\varphi_1}^{\#} + T_{\varphi_2}^{\#} =$$

$$= \frac{\pi \Delta f_{исх}}{[\Delta f_{ш1}^{\#}] \cdot [1 - 1/\sqrt{a_1^{\#}}]} + \frac{0,875\gamma_1^{\#}}{\Delta f_{ш1}^{\#}} + \frac{\ln(2\alpha_1^{\#})}{\Delta f_{ш1}^{\#}} + \frac{1}{\alpha_1^{\#}} \cdot \frac{\ln(2\alpha_2)}{\Delta f_{ш2}}; \quad (5)$$

$$K_p^\# = \frac{\alpha_2^\#}{\alpha_2} = \frac{\alpha_1^\#}{\alpha_2} \cdot \frac{\Delta f_{ш1}^\#}{L f_{ш2}} \cdot \frac{1}{(\beta-1)} = \frac{\alpha_1^\#}{\alpha_2} \cdot \frac{2}{g_1 (\beta-1)} \cdot \frac{1}{\sqrt{\gamma_1^\#}} \cdot \frac{\Delta f_{исх}}{\Delta f_{ш2}}, \quad (6)$$

где  $T_{\text{поиск}}$  – время поиска синхросигнала по частоте в исходной области неопределенности  $\Delta f_{исх}$ , величина которой определяется качеством синхронизации комплекса радиолинии (т.е. точностью и периодичностью сведения частот синхрогенераторов и стабильностью частоты последних) [1,2];  $T_f$  и  $T_\phi$  – время «затягивания» соответственно частоты и фазы в кольце ФАП [1,2];  $\gamma$  – коэффициент пропорционально - интегрирующего фильтра ( $\gamma \geq 1$  [3]);  $\Delta f_{ш}$  – шумовая полоса кольца ФАП;  $\alpha$  – отношение мощности синхросигнала к мощности шума в шумовой полосе  $\Delta f_{ш}$  кольца ФАП; подстрочные символы (1) и (2) означают отношение обозначенной величины (параметра, характеристики) соответственно к внешнему («первому») или к внутреннему («второму») кольцу ФАП предлагаемой системы синхронизации;  $g_1$  – коэффициент, определяющий соотношение между областью поиска (неопределённости) синхросигнала по частоте  $\Delta f_{исх}$  и зоной захвата («затягивания») частоты  $\Delta f_{захв1}$  внешнего кольца ФАП, причем [1, 2]:

$$g_1 \circ = \frac{\Delta f_{исх}}{\Delta f_{захв1}} = \frac{2\Delta f_{исх}}{\Delta f_{ш1}\sqrt{\gamma_1}} \geq 1; \quad \Delta f_{захв1} = \frac{\Delta f_{ш}}{2} \sqrt{\gamma} = \frac{\Delta f_{уд}}{\sqrt{\gamma}};$$

$\Delta f_{уд}$  – полоса удержания кольца ФАП;  $\beta$  – коэффициент делителя мощности (т.е. для целей синхронизации выделяется  $(1/\beta)$  – часть мощности информационного сигнала, а для получения полезной информации используется оставшаяся  $[(\beta - 1)/\beta]$  – часть мощности данного сигнала, причём  $1 < \beta < \infty$  (обычно  $10 \leq \beta \leq 10^2 + 10^3$  [3]).

Отметим, что в выражениях (3) и (5) при определении величин  $T_f$  и  $T_\phi$  предполагалось, что отношение сигнал /шум  $\alpha$  в шумовой полосе соответствующего кольца ФАП превышает значение  $10^2$ . Если  $\alpha < 10^2$ , то в данных формулах необходимо учитывать эффекты «замедления» процессов затягивания частоты и фазы синхросигнала. В частности, при  $\alpha = 10$  имеем

$$T_{f(\alpha=10)} = 2T_{f(\alpha \geq 10^2)} \quad \text{и} \quad T_{\phi(\alpha=10)} = 2T_{\phi(\alpha \geq 10^2)}.$$

Учитывается также специфика СВЧ диапазона волн, где основной вклад вносят аппаратные шумы, уровень которых, как правило, на 1-2 порядка и более превышает уровень шумов «спокойной» атмосферы (безоблачного неба [3]). Считая при этом, что величины  $\Delta f_{ш2}$  и  $\alpha_2$  опре-

делены однозначно – исходя из априорно заданного качества (точности) синхронизации, охарактеризуем специфику расчета и выбора значений  $\alpha$ ,  $\Delta f_{\text{исх}}$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  и  $g$  для случаев отсутствия или наличия во внешнем (первом) кольце ФАП поисковой схемы. Можно показать, что:

$$\gamma_1^* = \left(2 \frac{\Delta f_{\text{исх}}}{\Delta f_{\text{ш1}}^*}\right)^2; \Delta f_{\text{ш1}}^* = \frac{2\Delta f_{\text{исх}}}{\sqrt{\gamma_1}}; \alpha_1^* = \alpha_2^*(\beta-1) \frac{\Delta f_{\text{ш2}}}{\Delta f_{\text{ш1}}} = \alpha_2(\beta-1) \frac{\sqrt{\gamma_1^*}}{2} \cdot \frac{\Delta f_{\text{ш2}}}{\Delta f_{\text{исх}}};$$

$$\alpha_2^* = \alpha_1^* \frac{\Delta f_{\text{ш1}}^*}{\Delta f_{\text{ш2}}} \cdot \frac{1}{(\beta-1)} = \alpha_1^* \frac{2}{\sqrt{\gamma_1^*}(\beta-1)} \cdot \frac{\Delta f_{\text{исх}}}{\Delta f_{\text{ш2}}}; \gamma_2^* = \frac{\Delta f_{\text{ш1}}}{\Delta f_{\text{ш2}}} \sqrt{\gamma_1^*} = 2 \frac{\Delta f_{\text{исх}}}{\Delta f_{\text{ш2}}};$$

$$\Delta f_{\text{ш1}}^{\#} = \frac{2\Delta f_{\text{исх}}}{g\sqrt{\gamma_1^{\#}}}; \gamma_1^{\#} = \left(2 \frac{\Delta f_{\text{исх}}}{\Delta f_{\text{ш1}}^{\#}}\right)^2; \alpha_2^{\#} = \alpha_1^{\#} \frac{\Delta f_{\text{ш1}}^{\#}}{\Delta f_{\text{ш2}}} \cdot \frac{1}{(\beta-1)} = \frac{2}{g(\beta-1)} \cdot \frac{\alpha_1^{\#}}{\sqrt{\gamma_1^{\#}}} \cdot \frac{\Delta f_{\text{исх}}}{\Delta f_{\text{ш2}}};$$

$$\gamma_2^{\#} = \frac{2}{g} \cdot \frac{\Delta f_{\text{исх}}}{\Delta f_{\text{ш2}}^{\#}} = \frac{\Delta f_{\text{ш1}}^{\#}}{\Delta f_{\text{ш2}}} \sqrt{\gamma_1^{\#}}; \alpha_1^{\#} = \alpha_2^{\#}(\beta-1) \frac{\Delta f_{\text{ш2}}}{\Delta f_{\text{ш1}}^{\#}} = \frac{\alpha_2^{\#}}{2} \sqrt{\gamma_1^{\#}}(\beta-1)g \frac{\Delta f_{\text{ш2}}}{\Delta f_{\text{исх}}}.$$

В целом необходимо отметить, что применение предлагаемой адаптивной СВЧ системы позволяет в  $(\beta-1)$  раз повысить энергетику “синхроканала” в режиме установления (восстановления) состояния синхронизма. Это в свою очередь обеспечивает возможность ускорения поиска по частоте  $(\beta-1)^2$  раз и уменьшает время затягивания частоты во внешнем кольце системы в  $(\beta-1)$  раз. Соответственно снижаются потери полезной информации и уменьшается эффективная энергетическая цена её передачи. Таким образом, практическое использование описанного в данной работе адаптивного метода синхронизации позволяет существенно повысить эффективность функционирования систем связи и обеспечивает возможность дальнейшего повышения скорости передачи информации с априорно заданной верностью без снижения при этом точности синхронизации и без введения избыточности по энергетике “синхроканала”.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь. – М.: Связь, 1979. – 592 с
2. Радиосистемы передачи информации / И.М. Тепляков, Б.В. Роцин, А.И. Фомин, В.А. Вейцель. – М.: Радио и связь, 1982. – 264 с.
3. Галин А.С. Диапазонно - кварцевая стабилизация СВЧ. – М.: Связь, 1976 – 256 с.

Поступила 29.03.2002

**КОЗЕЛКОВ Сергей Викторович**, доктор техн. наук, ст. научн. сотр., зам. нач. кафедры НАОУ. В 1982 году окончил ХВВКИУ. Область научных интересов – радиотехника.

**ЗАГОРУЛЬКО Александр Николаевич**, зам. нач. ЦУП. В 1979 году окончил ХВВКИУ. Область научных интересов – радиотехника.