

УДК 621.396

*М. А. ИВАНОВ*, канд. техн. наук, *Б. И. МАКАРЕНКО*, д-р техн. наук,  
*О. Н. ПРОСУНКО*

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

---

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 [1]. В частности, требуемое для высокоскоростных связных радиолиний повышение быстродействия систем синхронизации в переходном режиме обычно обеспечивается увеличением избыточности по мощности синхросигнала (по сравнению с установившимся режимом), что приводит к ухудшению энергетических характеристик данных радиолиний [1; 2]. Поэтому необходима разработка нового и в максимальной степени свободного от указанных недостатков метода повышения интегральной эффективности для перспективного класса систем синхронизации линий связи по информационному сигналу.

Отметим, что информация, принятая при нарушениях 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 в ряде случаев приводит к нарушениям

цикловой (кадровой) синхронизации и, следовательно, к длительным перерывам в связи [2]. Таким образом, необходимо разрабатывать и применять адаптивные алгоритмы организации процесса синхронизации, предполагающие использование полной мощности информационного сигнала для ускоренного установления (восстановления) состояния синхронизма в целях сокращения необратимых потерь полезной информации и повышения надежности связи. Учитывая специфику приемников СВЧ-диапазона волны, где уровень шумов определяется преимущественно местными аппаратурными флюктуациями [4], целесообразно изменять энергетику синхроканала при переходах от режима захвата к режиму удержания и обратно. В этом случае формальная математическая запись искомого адаптивного алгоритма синхронизации имеет вид

$$\begin{aligned}
 U_{\text{вых ФД}_2} < U_{\text{п}} &\Rightarrow \left( \begin{array}{l} \text{„}C_{\text{T}}\text{“} \div 1/\beta; \text{ „}I\text{“} \div (\beta - 1)/\beta \\ \text{„}C_{\text{Г}}\text{“} \div 0 \end{array} \right); \\
 U_{\text{вых ФД}_2} \geq U_{\text{п}} &\Rightarrow \left( \begin{array}{l} \text{„}C_{\text{T}}\text{“} \div 1/\beta; C_{\text{Г}} \div (\beta - 1)/\beta \\ \text{„}I\text{“} \div 0 \end{array} \right),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $U_{\text{вых ФД}_2}$  — напряжение на выходе внутреннего кольца точной синхронизации;  $U_{\text{п}}$  — пороговое значение  $U_{\text{вых ФД}_2}$ , характеризующее наличие при  $U_{\text{вых ФД}_2} < U_{\text{п}}$  или отсутствие при  $U_{\text{вых ФД}_2} \geq U_{\text{п}}$  состояния точного синхронизма, т. е. режима точного удержания во внутреннем кольце;  $I$ ,  $C_{\text{T}}$ ,  $C_{\text{Г}}$  — обозначения информационного канала точного и грубого синхроканалов; верхняя строка в круглых скобках выражения (1) указывает рабочие (в данный момент времени) каналы, а нижняя строка означает неработающий в это время канал приемника сигналов; величина, отделенная знаком  $\div$ , характеризует энергетику, т. е. отводимую часть полной мощности информационного сигнала соответствующего канала приемника сигналов. При этом ускорение процессов установления и восстановления состояния синхронизма обеспечивается в результате использования в грубом синхроканале приемника той доли  $(\beta - 1)/\beta$  мощности сигнала, которая в стационарном состоянии синхронизма служит для выделения в информационном канале приемника полезных сообщений. Таким образом, информационный канал и грубый синхроканал приемника одновременно функционировать не могут, в то время как его точный синхроканал работает постоянно — для обеспечения процессов извлечения информации и в целях 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 [3], позволяющую осуществить одновременный и компактный учет как точностных и динамических характеристик, так и энергетических параметров систем синхронизации. Считая при этом задан-

ными качество синхронизации линии и комплекса линий связи, запишем следующее выражение для определения эффективной энергетической цены

$$E_{\text{эфф}} = E_{\text{н}} \frac{T_{\text{с}}}{T_{\text{с}} - T_{\Sigma}(1 + k_{\text{н}}^{-1})} + qk_{\text{р}}E_{\text{с}}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{н}}$ ,  $E_{\text{с}}$  — реальная энергетическая цена передачи единицы полезной информации и синхроиформации, причем различие величин  $E_{\text{н}}$  и  $E_{\text{с}}$  обусловлено спецификой информационного канала и синхроканала;  $T_{\text{с}}$  — длительность сеанса связи;  $T_{\Sigma}$  — среднее время вхождения в синхронизм;  $q$  — коэффициент, равный отношению переданного за сеанс связи объема синхроиформации к объему 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);  $k_{\text{р}}$  — 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, в целях обеспечения ускоренного вхождения в синхронизм и т. п.),  $k_{\text{р}} \geq 1$ ;  $k_{\text{н}}$  — коэффициент, характеризующий надежность синхронизации и равный среднему числу срывов синхронизации за сеанс связи.

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

На рисунке представлена обобщенная функциональная схема адаптивной (самоорганизующейся) системы синхронизации, реализующей алгоритм (1). 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  $г$ ,  $т$  обозначают принадлежность соответствующего функционального элемента к «грубому» (внешнему быстродействующему) или к «точному» (внутреннему инерционному) кольцу АПЧ.



где  $T_{\text{поиск}}$  — время поиска синхросигнала по частоте в исходной области неопределенности  $\Delta f_{\text{исх}}$ , величина которой определяется качеством синхронизации комплекса радиолиний, т. е. точностью и периодичностью сведения частот синхрогенераторов и стабильностью частоты последних [1; 2];  $T_f, T_\varphi$  — время «затягивания» частоты и фазы в кольце ФАП [1; 2];  $\gamma$  — коэффициент пропорционально-интегрирующего фильтра,  $\gamma \geq 1$  [4];  $\Delta f_{\text{ш}}$  — шумовая полоса кольца ФАП;  $\alpha$  — отношение мощности синхросигнала к мощности шума в шумовой полосе  $\Delta f_{\text{ш}}$  кольца ФАП; подстрочные символы (1), (2) означают отношение обозначенной величины (параметра, характеристики) к внешнему (первому) или к внутреннему (второму) кольцу ФАП предлагаемой системы синхронизации;  $g_1$  — коэффициент, определяющий соотношение между областью поиска (неопределенности) синхросигнала по частоте  $\Delta f_{\text{исх}}$  и зоной захвата (затягивания) частоты  $\Delta f_{\text{захв}_1}$  внешнего кольца ФАП [1; 2; 4],

$$g_1 = \frac{\Delta f_{\text{исх}}}{\Delta f_{\text{захв}_1}} = \frac{2\Delta f_{\text{исх}}}{\Delta f_{\text{ш}_1} \sqrt{\gamma_1}} > 1, \quad \Delta f_{\text{захв}_1} = \frac{\Delta f_{\text{ш}_1} \sqrt{\gamma}}{2} = \frac{\Delta f_{\text{уд}}}{\sqrt{\gamma}}$$

$\Delta f_{\text{уд}}$  — полоса удержания кольца ФАП;  $\beta$  — коэффициент делителя мощности. Для целей синхронизации выделяется  $(1/\beta)$  — часть мощности информационного сигнала, а для получения полезной информации используется оставшаяся часть мощности данного сигнала  $[(\beta-1)/\beta]$ ,  $1 < \beta < \infty$ , обычно  $10 \leq \beta \leq 10^2 \div 10^3$  [5].

В выражениях (3), (5) при определении величин  $T_f, T_\varphi$  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  $T_{f(\alpha=10)} = 2T_{f(\alpha>10^2)}$ ;  $T_{\varphi(\alpha=10)} = 2T_{\varphi(\alpha>10^2)}$ . Учитывается также специфика СВЧ-диапазона волн, где основной вклад вносят аппаратурные шумы, уровень которых, как правило, на 1—2 порядка и более превышает уровень шумов спокойной атмосферы [4]. Предполагая, что величины  $\Delta f_{\text{ш}_1}, \alpha_2$  определены однозначно, исходя из априорно заданного качества (точности) синхронизации, охарактеризуем специфику расчета и выбора значений  $\alpha, \Delta f_{\text{ш}_1}, \gamma_1, \gamma_2, g$  для случаев отсутствия или наличия во внешнем (первом) кольце ФАП поисковой схемы. Можно показать, что

$$\gamma_1^* = \left( 2 \frac{\Delta f_{\text{исх}}}{\Delta f_{\text{ш}_1}^*} \right)^2 \quad (7); \quad \Delta f_{\text{ш}_1}^* = \frac{2\Delta f_{\text{исх}}}{\sqrt{\gamma_1}} \quad (8)$$

$$\gamma_2^* = \frac{\Delta f_{\text{ш}_1}}{\Delta f_{\text{ш}_2}} \sqrt{\gamma_1^*} = 2 \frac{\Delta f_{\text{исх}}}{\Delta f_{\text{ш}_2}} \quad (9)$$

$$\alpha_1^* = \alpha_2^* (\beta - 1) \frac{\Delta f_{\text{ш}_2}}{\Delta f_{\text{ш}_1}} = \alpha_2 (\beta - 1) \frac{\sqrt{\gamma_1^*} \Delta f_{\text{ш}_2}}{2 \Delta f_{\text{исх}}} \quad (10)$$

$$\alpha_2^* = \alpha_1^* \frac{\Delta f_{w_1}^*}{\Delta f_{w_2}} \frac{1}{(\beta - 1)} = \alpha_1^* \frac{2}{\sqrt{\gamma_1^* (\beta - 1)}} \frac{\Delta f_{ncx}}{\Delta f_{w_2}}; \quad (11)$$

$$\Delta f_{w_1}^{\#} = \frac{2\Delta f_{ncx}}{g\sqrt{\gamma_1^{\#}}} \quad (12); \quad \gamma_1^{\#} = \left(2 \frac{\Delta f_{ncx}}{\Delta f_{w_1}^{\#}}\right)^2; \quad (13)$$

$$\gamma_2 = \frac{2}{g} \frac{\Delta f_{ncx}^{\#}}{\Delta f_{w_2}} = \frac{\Delta f_{w_1}^{\#}}{\Delta f_{w_2}} \sqrt{\gamma_1^{\#}}; \quad (14)$$

$$\alpha_2^{\#} = \alpha_1^{\#} \frac{\Delta f_{w_1}^{\#}}{\Delta f_{w_2}} \frac{1}{(\beta - 1)} = \frac{2}{g(\beta - 1)} \frac{\alpha_1^{\#}}{\sqrt{\gamma_1^{\#}}} \frac{\Delta f_{ncx}}{\Delta f_{w_2}}; \quad (15)$$

$$\alpha_1^{\#} = \alpha_2^{\#} (\beta - 1) \frac{\Delta f_{w_2}}{\Delta f_{w_1}^{\#}} = \frac{\alpha_2^{\#}}{2} \sqrt{\gamma_1^{\#} (\beta - 1)} g \frac{\Delta f_{w_2}}{\Delta f_{ncx}}. \quad (16)$$

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 ее 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 введения избыточности по энергетике синхроканала.

**Список литературы:** 1. *Спилкер Дж.* Цифровая спутниковая связь/Пер. с англ.; Под ред. В. В. Маркова. — М.: Связь, 1979. — 592 с. 2. *Радиосистемы передачи информации/И. И. Тепляков, Б. В. Рошин, А. И. Фомин, В. А. Вейцель.* — М.: Радио и связь, 1982. — 264 с. 3. *Ванькевич В. В., Иванов М. А., Макаренко Б. И.* Исследование принципиальных и практических ограничений точности синхронизации связанных радиосистем//Радиотехника. — 1985. — Вып. 75. — С. 126—133. 4. *Галин А. С.* Диапазонно-кварцевая стабилизация СВЧ. — М.: Связь, 1976. — 256 с. 5. *Смирнов Н. И., Заличев Н. М.* Оптимизация распределения мощности в системах передачи с каналом синхронизации//Электросвязь. — 1982, № 6. — С. 11—18.

Поступила в редколлегию 18.02.86