

АНАЛИЗ ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГА ШКАЛ В СИСТЕМАХ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

Анализ принципов построения и источников погрешностей систем синхронизации времени и частоты показывает особую роль, которую играют алгоритмы измерений сдвига шкал времени [1]. Алгоритмы измерений обеспечивают учет либо исключение времени задержки сигналов синхронизации в среде распространения. Особая роль алгоритмов измерений сдвига шкал объясняется следующими причинами:

- 1) эти алгоритмы присущи только системам синхронизации;
- 2) выбор алгоритма измерений существенно влияет на особенности технической реализации системы синхронизации в целом;
- 3) различные алгоритмы измерений сдвига шкал времени по разному трансформируют источники погрешностей в суммарную погрешность измерений;
- 4) алгоритмы измерений сдвига шкал времени непосредственно связаны с заключительным этапом измерений – обработкой их результатов.

Выбор алгоритма измерения сдвига шкал определяется прежде всего, исходя из особенностей и параметров используемого в системе синхронизации канала распространения радиоволн. Основными алгоритмами измерения сдвига шкал являются: пассивный непосредственный алгоритм (ПНА); пассивный взаимный алгоритм (ПВА); активный встречный алгоритм (АВА); активный ретрансляционный алгоритм (АРА); активный опорно-ретрансляционный алгоритм (АОРА) [1, 2]. Предварительное сравнение основных алгоритмов (см. таблицу) показывает, что предпочтительных во всех отношениях алгоритмов не существует. В то же время некоторые перспективные каналы распространения радиоволн не могут быть применены для синхронизации из-за несовместимости с существующим арсеналом алгоритмов. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможные пути совершенствования алгоритмов измерения сдвига шкал.

Таблица

Характеристики алгоритмов	Основные алгоритмы			
	Пассивные		Активные	
	ПНА	ПВАИ	АВА	АРА и АОРА
Требования к задержке сигналов в канале	Задержка в канале должна оцениваться.	Должна оцениваться разность задержек в канале.	Задержка в канале должна быть стабильной и обратимой.	
Достоинства	Отсутствие излучения в одном из пунктов синхронизации.	Отсутствие излучения в пунктах синхронизации. Исключение погрешностей, вызванных общими источниками.	Задержка сигналов в канале исключается.	
Недостатки	Погрешности определения задержек в канале. Необходимость обмена информацией о результатах измерений.		Необходимость обмена информацией о результатах измерений.	Излучение в пунктах
Примеры реализации	Телевизионный метод синхронизации; системы СДВ и ДВ диапазонов; спутниковые радионавигационные системы GPS и ГЛОНАСС; отражение сигналов от Луны; кабельные, лазерные и волоконно-оптические линии.	Спутниковые радионавигационные системы GPS и ГЛОНАСС; радиоинтерферометры со сверхдлинными базами.	Радиометеорный метод синхронизации; спутники связи; кабельные, лазерные и волоконно-оптические линии.	

На рис.1 показаны используемые алгоритмы для наиболее распространенных методов синхронизации и возможные пути совершенствования алгоритмов. Целями совершенствования алгоритмов являются:

1) модернизация существующих методов синхронизации путем изменения алгоритма;

2) модернизация существующих и создание новых методов синхронизации с использованием комбинированных алгоритмов, являющихся сочетанием двух и более основных алгоритмов измерения сдвига шкал;

3) повышение точности и снижение энергетических затрат ретрансляционных алгоритмов.

Примером модернизации существующего метода синхронизации путем изменения алгоритма может служить использование ПНА в радиометеорном методе синхронизации. Особенности реализации, достоинства и ожидаемые погрешности такого пассивного радиометеорного метода синхронизации рассмотрены в работе [2].

Сочетание основных алгоритмов измерения сдвига шкал возможно в следующих случаях (рис. 2-4):

1) ПНА или ПВА являются основными алгоритмами, а активный алгоритм может быть использован для оценивания задержки сигналов в канале (в случае ПНА) или разности задержек в канале (в случае ПВА);

2) один из активных алгоритмов является основным, а пассивный алгоритм позволит выполнить обнаружение сигналов, грубое измерение сдвига шкал и др.

Временные диаграммы для двух возможных вариантов первого из перечисленных случаев приведены на рис. 2, 3. Эти режимы могут найти применение для калибровки задержек в телевизионном методе синхронизации, уточнения аппаратурных систематических погрешностей при синхронизации с применением спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС (непосредственный и взаимный алгоритмы).

На рис. 4 приведена диаграмма для одного из возможных вариантов второго случая сочетания основных алгоритмов. Такой вариант широко применяется в радиометеорном методе для предварительной грубой синхронизации шкал времени. Для этого в радиометеорной аппаратуре введен, так называемый, режим « T_1 ».

Для снижения случайных погрешностей, вызванных конечным отношением сигнал/помеха и нестабильностью времени задержки сигналов при распространении радиоволн (РРВ), предложен ряд комбинированных и модифицированных ретрансляционных и опорно-ретрансляционных алгоритмов [5, 6].

В известном опорно-ретрансляционном алгоритме измерения сдвига шкал [1, 3-5] для получения одного измерения в каждом из пунктов необходимо четыре излучения. Для сокращения излучаемой энергии предложен алгоритм повторной опорной ретрансляции (АПОР). В предлагаемом алгоритме один из пунктов, например, пункт В работает в ждущем режиме, а пункт А – в активном режиме.



Рис. 1

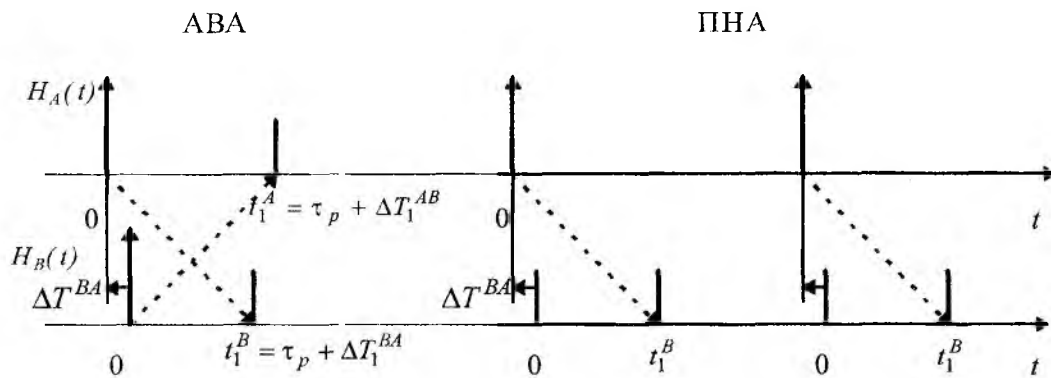


Рис. 2

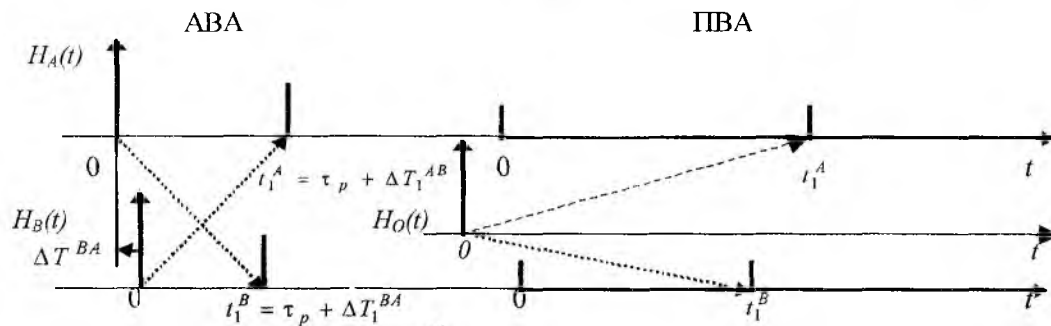


Рис. 3

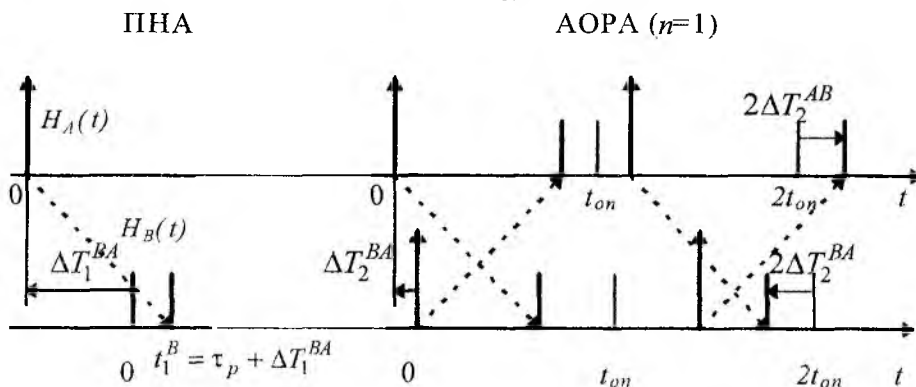


Рис. 4

Сигнал, принятый в пункте B , опорно ретранслируется с коэффициентом ретрансляции $n_B=1$. После приема этого сигнала в пункте A производится первая оценка сдвига шкал $\hat{\Delta T}_1^{AB}$ и организуется повторная ретрансляция с учетом измеренного в этом пункте значения сдвига шкал. На рис. 5 показан один из вариантов повторной ретрансляции, в котором в роли опорного импульса выступает очередной импульс шкалы времени пункта A , а ретранслируемый сигнал сдвинут относительно него на величину $n_A \cdot \hat{\Delta T}_1^{AB}$, где n_A – коэффициент опорной ретрансляции ($n_A \neq 0$). В пункте B оцениваются временное положение принятого сигнала и сдвиг шкал $\hat{\Delta T}_2^{BA}$, а также выполняется еще одна опорная ретрансляция с коэффициентом $n_B=1$. После приема этого сигнала в пункте A производится вторая оценка сдвига шкал $\hat{\Delta T}_2^{AB}$.

Рассмотрим основные соотношения для измерения сдвига шкал применительно к АПОР.

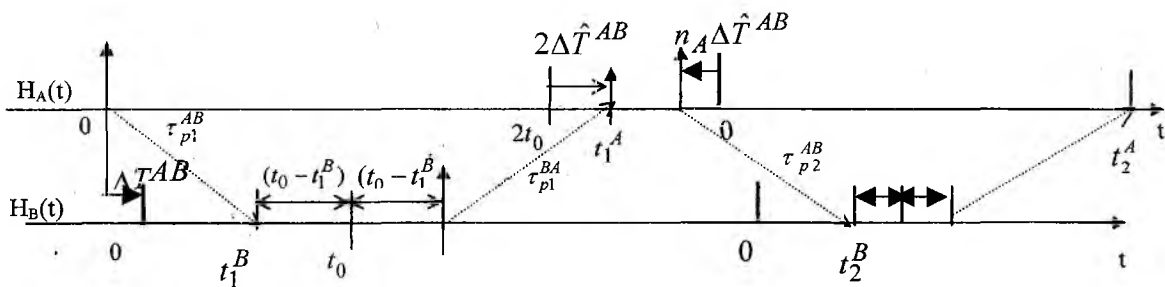


Рис. 5

Измеренные значения временного положения сигналов в пунктах составят:

$$t_1^B = \tau_{p1}^{AB} + \Delta T^{BA} + \delta_{t1}^B + \tau_{PRD}^A + \tau_{PRM}^B,$$

$$t_1^A = 2t_0 + 2\Delta T^{AB} + (\delta_{t1}^A - \delta_{t1}^B) + (\tau_{p1}^{BA} - \tau_{p1}^{AB}) + (\tau_{PRM}^A - \tau_{PRD}^A) - (\tau_{PRM}^B - \tau_{PRD}^B),$$

$$t_2^B = n_A \Delta T_1^{AB} + (1 - n_A) \Delta T^{BA} + \frac{2\delta_{t2}^B + n_A(\delta_{t1}^A - \delta_{t1}^B)}{2} + \frac{n_A(\tau_{p1}^{BA} - \tau_{p1}^{AB}) + 2\tau_{p2}^{AB}}{2} +$$

$$+ \frac{n_A(\tau_{PRM}^A + \tau_{PRD}^B) - (n_A - 2)(\tau_{PRD}^A + \tau_{PRM}^B)}{2},$$

$$t_2^A = 2\Delta T^{AB} + 2t_0 + (\delta_{t2}^A - \delta_{t2}^B) + (\tau_{p2}^{BA} - \tau_{p2}^{AB}) + (\tau_{PRM}^A - \tau_{PRD}^A) - (\tau_{PRM}^B - \tau_{PRD}^B),$$

где $\delta_{t1}^A, \delta_{t1}^B, \delta_{t2}^A, \delta_{t2}^B$ – абсолютные погрешности оценки временного положения сигналов, вызванные конечным соотношением сигнал/помеха в пунктах; $\tau_{p1}^{AB}, \tau_{p1}^{BA}, \tau_{p2}^{AB}, \tau_{p2}^{BA}$ – соответствующие задержки сигналов при РРВ; $\tau_{PRM}^A, \tau_{PRD}^A, \tau_{PRM}^B, \tau_{PRD}^B$ – задержки сигналов в приемных и передающих трактах аппаратуры соответствующих пунктов.

Оценки сдвига шкал в пункте A можно выполнить в виде:

$$\Delta \hat{T}_1^{AB} = \frac{t_1^A - 2t_0}{2} = \Delta T^{AB} + \frac{\delta_{t1}^A - \delta_{t1}^B}{2} + \frac{\tau_{p1}^{BA} - \tau_{p1}^{AB}}{2} + \frac{(\tau_{PRM}^A - \tau_{PRD}^A) - (\tau_{PRM}^B - \tau_{PRD}^B)}{2},$$

$$\Delta \hat{T}_2^{AB} = \frac{t_2^A - 2t_0}{2} = \Delta T^{AB} + \frac{\delta_{t2}^A - \delta_{t2}^B}{2} + \frac{\tau_{p2}^{BA} - \tau_{p2}^{AB}}{2} + \frac{(\tau_{PRM}^A - \tau_{PRD}^A) - (\tau_{PRM}^B - \tau_{PRD}^B)}{2}. \quad (1)$$

По результатам измерений в пункте B можно оценить сдвиг шкал следующим образом:

$$\Delta \hat{T}^{BA} = \frac{t_1^B - t_2^B}{n_A} = \Delta T^{BA} + \frac{(n_A + 2)\delta_{t1}^B - 2\delta_{t2}^B - n_A\delta_{t1}^A}{2n_A} +$$

$$+ \frac{(n_A + 2)\tau_{p1}^{AB} - 2\tau_{p2}^{AB} - n_A\tau_{p1}^{BA}}{2n_A} + \frac{(\tau_{PRM}^B - \tau_{PRD}^B) - (\tau_{PRM}^A - \tau_{PRD}^A)}{2}. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) позволяют оценить абсолютную погрешность измерения сдвига шкал в пунктах в виде:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_{СП} + \delta_{РРВ} + \delta_{АП},$$

где $\delta_{СП}$ – помеховая погрешность, вызванная конечным соотношением сигнал/помеха в пунктах; $\delta_{РРВ}$ – канальная погрешность, вызванная нестабильностью задержек сигналов при РРВ; $\delta_{АП}$ – аппаратурная погрешность, вызванная нестабильностью задержек сигналов в аппаратуре.

Помеховые, каналные и аппаратные погрешности измерений сдвига шкал в пунктах составляют:

$$\delta_{1C/\Pi}^A = \frac{\delta_{i1}^A - \delta_{i1}^B}{2n_A}, \quad \delta_{2C/\Pi}^A = \frac{\delta_{i2}^A - \delta_{i2}^B}{2n_A}, \quad \delta_{C/\Pi}^B = \frac{(n_A + 2)\delta_{i1}^B - 2\delta_{i2}^B - n_A\delta_{i1}^A}{2n_A}, \quad (3)$$

$$\delta_{1PPB}^A = \frac{\tau_{p1}^{BA} - \tau_{p1}^{AB}}{2}, \quad \delta_{2PPB}^A = \frac{\tau_{p2}^{BA} - \tau_{p2}^{AB}}{2}, \quad \delta_{PPB}^B = \frac{(n_A + 2)\tau_{p1}^{AB} - 2\tau_{p2}^{AB} - n_A\tau_{p1}^{BA}}{2n_A}, \quad (4)$$

$$\delta_{АП}^A = \frac{(\tau_{ПРМ}^A - \tau_{ПРД}^A) - (\tau_{ПРМ}^B - \tau_{ПРД}^B)}{2}, \quad \delta_{АП}^B = \frac{(\tau_{ПРМ}^B - \tau_{ПРД}^B) - (\tau_{ПРМ}^A - \tau_{ПРД}^A)}{2}. \quad (5)$$

Используя выражения (3) и полагая погрешности оценки временного положения сигналов в пунктах случайными некоррелированными величинами с нулевыми средними значениями, можно записать выражения для СКО помеховых погрешностей измерений сдвига шкал в пунктах:

$$\sigma_{\Delta T}^{AB} = \frac{\sqrt{(\sigma_i^A)^2 + (\sigma_i^B)^2}}{2} = \frac{\sigma_i^A \sqrt{1 + 10^{0,1m}}}{2}, \quad (6)$$

$$\sigma_{\Delta T}^{BA} = \frac{\sigma_i^A \sqrt{n_A^2 + 10^{0,1m}(n_A^2 + 4n_A + 8)}}{2|n_A|}, \quad (7)$$

где σ_i^A, σ_i^B – СКО оценки временного положения сигналов в пунктах A и B соответственно; $10^{0,1m} = (\sigma_i^B / \sigma_i^A)^2$, m – отношение СКО оценок временного положения сигналов в пунктах B и A в децибелах.

СКО результата измерения сдвига шкал в пункте A соответствует встречному алгоритму. Применив выражение (6) для нормировки, запишем относительные погрешности измерения сдвига шкал в пунктах:

$$\left(\frac{\sigma_{\Delta T}^{AB}}{\sigma_i^A}\right) = 1, \quad \left(\frac{\sigma_{\Delta T}^{BA}}{\sigma_i^A}\right) = \frac{\sigma_{\Delta T}^{BA}}{\sigma_{\Delta T}^{AB}} = \frac{\sqrt{n_A^2 + 10^{0,1m}(n_A^2 + 4n_A + 8)}}{|n_A| \sqrt{1 + 10^{0,1m}}}. \quad (8)$$

Получим соотношение для коэффициента корреляции случайных помеховых погрешностей измерения сдвига шкал в пунктах:

$$R = \frac{\delta_{C/P}^A \cdot \delta_{C/P}^B - \delta_{C/P}^A \cdot \delta_{C/P}^A}{\sigma_{\Delta T}^{AB} \cdot \sigma_{\Delta T}^{BA}} = - \frac{[(n_A + 2)10^{0,1m} + n_A] \cdot |n_A|}{n_A \sqrt{(1 + 10^{0,1m})} \cdot [n_A^2 + (n_A^2 + 4n_A + 8) \cdot 10^{0,1m}]}. \quad (9)$$

Для анализа каналных погрешностей измерения сдвига шкал в пунктах примем линейную модель изменения задержки сигналов при РРВ:

$$\tau_{p1}^{BA} = \tau_{p1}^{AB} + V_\tau \cdot \Delta\tau_1, \quad \tau_{p2}^{AB} = \tau_{p1}^{BA} + V_\tau \cdot \Delta\tau_2 = \tau_{p1}^{AB} + V_\tau \cdot (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2),$$

$$\tau_{p2}^{BA} = \tau_{p2}^{AB} + V_\tau \cdot \Delta\tau_3 = \tau_{p1}^{AB} + V_\tau \cdot (\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3),$$

где $\Delta\tau_1; \Delta\tau_2; \Delta\tau_3$ – интервалы времени между моментами прохождения радиоволн через середину трассы для соответствующих циклов ретрансляции; $V_\tau = \frac{d\tau_p(t)}{dt}$ – скорость изменения задержки сигналов при РРВ.

Для выбранной модели изменения задержки сигналов при РРВ каналные погрешности измерения сдвига шкал составят:

$$\delta_{1PPB}^A = \frac{\tau_{p1}^{BA} - \tau_{p1}^{AB}}{2} = \frac{V_\tau \cdot \Delta\tau_1}{2}, \quad \delta_{2PPB}^A = \frac{\tau_{p2}^{BA} - \tau_{p2}^{AB}}{2} = \frac{V_\tau \cdot \Delta\tau_3}{2}, \quad (10)$$

$$\delta_{PPB}^B = -\frac{V_\tau \cdot [(n_A + 2) \cdot \Delta\tau_1 + 2\Delta\tau_2]}{2n_A}. \quad (11)$$

При обмене результатами измерений между пунктами можно выполнить совместную обработку результатов измерений. Оценка сдвига шкалы пункта *B* относительно пункта *A* в случае совместной обработки составит:

$$\Delta\hat{T}^{\Sigma BA} = \frac{\Delta\hat{T}^{BA} - \Delta\hat{T}^{AB}}{2} = \Delta T^{BA} + \frac{(n_A + 1)\delta_{i1}^B - \delta_{i2}^B - n_A\delta_{i1}^A}{2n_A} + \frac{(n_A + 1)\tau_{p1}^{AB} - \tau_{p2}^{AB} - n_A\tau_{p1}^{BA}}{2n_A} + \frac{(\tau_{ПРМ}^B - \tau_{ПРД}^B) - (\tau_{ПРМ}^A - \tau_{ПРД}^A)}{2}.$$

Выражения для случайной помеховой, аппаратурной и канальной погрешностей для совместной обработки результатов измерений в пунктах имеют вид:

$$\sigma_{\Delta T}^{\Sigma BA} = \frac{\sigma_i^A \sqrt{n_A^2 + 10^{0,1m}(n_A^2 + 2n_A + 2)}}{2|n_A|}, \quad \delta_{АП}^{\Sigma BA} = \frac{(\tau_{ПРМ}^B - \tau_{ПРД}^B) - (\tau_{ПРМ}^A - \tau_{ПРД}^A)}{2}, \quad (12)$$

$$\delta_{PPB}^{\Sigma BA} = -\frac{V_\tau \cdot [(n_A + 1) \cdot \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2]}{2n_A}. \quad (13)$$

Относительная случайная помеховая погрешность для совместной обработки АПОР составляет:

$$\left(\sigma_{\Delta T}^{\Sigma BA}\right)' = \frac{\sqrt{n_A^2 + 10^{0,1m}(n_A^2 + 2n_A + 2)}}{|n_A| \cdot \sqrt{1 + 10^{0,1m}}}. \quad (14)$$

На рис. 6–8 приведены графики зависимостей СКО единичного измерения сдвига шкал в пункте *B*, СКО для совместной обработки результатов в пунктах и коэффициента корреляции случайных помеховых погрешностей от коэффициента ретрансляции в пункте *A* для $m=0$. Графики построены по теоретическим соотношениям и путем моделирования (показаны точками).

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- 1) предложенный АПОР позволяет сократить энергию излучения по сравнению с известными алгоритмами опорной ретрансляции без потери точности синхронизации;
- 2) случайная погрешность измерения в пункте, работающем в активном режиме, совпадает со случайной погрешностью встречного алгоритма;
- 3) случайная погрешность измерения сдвига шкал в пункте, работающем в ждущем режиме, зависит от коэффициента ретрансляции в активном пункте (n_A); эта погрешность минимальна при $n_A = -4$ и совпадает со случайной погрешностью встречного алгоритма при $n_A = -2$;
- 4) в случае совместной обработки результатов измерения сдвига шкал случайная погрешность не уменьшается; эта погрешность минимальна при $n_A = -2$ и совпадает со случайной погрешностью встречного алгоритма при $n_A = -1$;
- 5) аппаратурные погрешности АПОР и других алгоритмов совпадают;
- 6) канальная погрешность измерения сдвига шкал в активном пункте соответствует основному алгоритму опорной ретрансляции для $n = 1$;
- 7) канальная погрешность измерения сдвига шкал в пункте, работающем в ждущем режиме, при известных соотношениях между $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$ может быть сведена к нулю при определенном значении n_A .

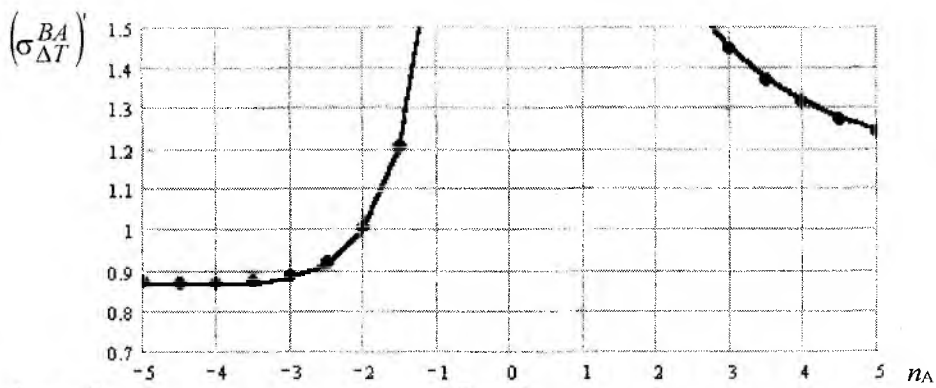


Рис. 6

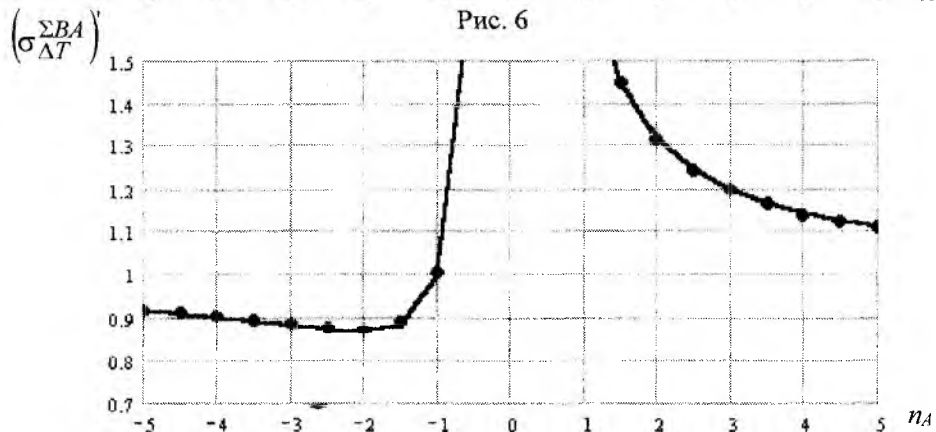


Рис. 7

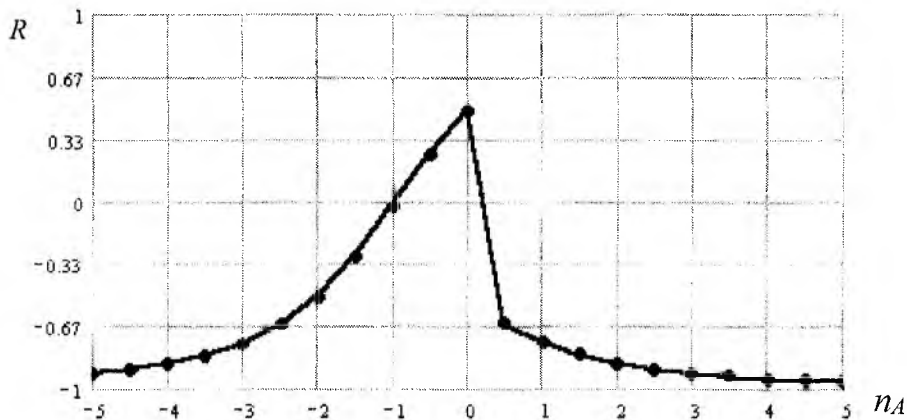


Рис. 8

Список литературы: 1. Коваль Ю.А., Троцин О.Л. Анализ алгоритмов синхронизации эталонов времени и частоты // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2000. Вып. 113. С. 47-52. 2. Антипов И.Е., Бавыкина В.В., Коваль Ю.А., Нестеренко Г.В., Троцин О.Л. Приём телевизионных сигналов времени и частоты по метеорному радиоканалу // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2000. Вып. 117. 3. А.С. 712807 СССР, МКИ G 04 C 11/02. Способ сравнения шкал времени / Б.С.Дудник, Б.Л. Кащеев, В.П. Моисеев. Опубл. 7.06.80 Бюл. №4. 4. А.С. 1167573 СССР, МКИ G 04 C 11/02. Способ сличения шкал времени и устройство для его осуществления / Б.С. Дудник, В.П. Моисеев. N 2737342; заявл. 16.03.79. Опубл. 09.05.85. Бюл. N 26. 5. Кащеев Б.Л., Коваль Ю.А., Горбач В.И., Бондарь Б.Г. Метеоры сегодня. К.: Техника, 1996. 196 с. 6. А.С. 1644079 СССР, МКИ G 04 C 11/02. Способ сличения шкал времени и устройство для его осуществления / В.В. Бавыкина, В.П. Моисеев. N 4357373; заявл. 5.01.81. Опубл. 23.04.91. Бюл. N 15.

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 4.01.2001