УДК 656

DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-5-19-28

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ ВЧ-СИГНАЛОВ В ПЕРЕДАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ КУРСОВОГО РАДИОМАЯКА НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ ФАЗ

Д.Д. ГАБРИЭЛЬЯН¹, П.И. КОСТЕНКО², О.А. САФАРЬЯН³

¹Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи,
г. Ростов-на-Дону, Россия

²Ростовский филиал МГТУ ГА, г. Ростов-на-Дону, Россия

³Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ, грант № 19-01-00151/20

В статье на основе использования метода статистической стабилизации частоты рассмотрены вопросы повышения стабильности частоты и синхронизации формируемых ВЧ-сигналов в передающей части КРМ при использовании многоканального варианта построения. Показано, что наличие цифрового устройства коррекции частоты и фазы позволяет легко реализовать предлагаемый метод. Отмечены два основных фактора, влияющих на стабильность частоты и синхронизацию фаз ВЧ-сигналов при эксплуатации КРМ. Первый фактор определяется отклонением текущей (на интервале измерений) частоты i -го ВЧ-сигнала от среднего значения $\Delta f_n^{(i)}$ частоты в n -м канале. Второй фактор связан с изменением в процессе эксплуатации КРМ средней частоты каждого из формируемых ВЧ-сигналов и отклонением ее на величину $\delta f_n^{(i)}$ от номинального значения. На основе описания ВЧ-сигналов в каналах передающей части КРМ получены соотношения, определяющие оптимальные в смысле метода наименьших квадратов оценки как отклонений $\Delta f_n^{(i)}$ текущих значений частоты от среднего значения, так и изменения среднего значения частоты при эксплуатации КРМ. Рассмотрен наиболее важный с практической точки зрения случай оценки только отклонений текущих значений частоты ВЧ-сигнала от среднего значения на интервале измерений. Показано, что применение метода статистической стабилизации частоты позволяет для передающей части КРМ, включающей N каналов формирования ВЧ-сигналов, повысить стабильность частоты и синхронизацию фазы ВЧ-сигнала в $\sqrt{N}$ раз. Это позволяет повысить точность формирования суммарной и разностной диаграмм направленности и соответственно установки линии курса в направлении взлетно-посадочной полосы. Кроме того, на основе полученных значений оценок параметров частоты и относительной нестабильности формируемых ВЧ-сигналов может приниматься решение о состоянии контролируемого параметра по критерию НОРМА – УХУДШЕНИЕ – АВАРИЯ.

Ключевые слова: курсовой радиомаяк, антенная решетка, ВЧ-сигнал, стабильность частоты, синхронизация фаз, оценки отклонения частоты и фазы от номинальных значений.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение интенсивности взлетов/посадок самолетов в аэропортах различного класса наряду с одновременным усилением требований безопасности полетов обуславливают необходимость дальнейшего совершенствования аэродромного оборудования. Наиболее жесткие требования предъявляются к аэродромным радиотехническим системам обеспечения захода самолетов на посадку, являющуюся наиболее сложным этапом полета. При решении этих вопросов можно выделить направления, связанные с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), а также информации, получаемой на основе сигналов телекоммуникационных систем [1–9]. Однако в настоящее время и в ближайшей перспективе наиболее востребованным остается использование в составе системы посадки аэродромного оборудования курсовых радиомаяков (КРМ). Основная задача КРМ заключается в формировании требуемого распределения напряженности электромагнитного поля, позволяющего определить положение самолета относительно оси взлетно-посадочной полосы [10, 11].

В современных КРМ, в частности КРМ *Loc 2700*, применен вариант построения, основанный на:

- использовании для каждого излучателя антенной решетки четырех передающих модулей (А, В, С, D), формирующих модулированные по амплитуде частотами $f_1 = 90$ Гц и $f_2 = 150$ Гц ВЧ-сигналы;
- объединении суммарного и разностного сигналов для каждого из двух угловых секторов, формируемых КРМ, в один высокочастотный тракт.

Структурная схема КРМ для данного варианта построения приведена на рис. 1.

Рис. 1. Структурная схема КРМ *Loc 2700*
Fig. 1. Block diagram of the CRM *Loc 2700*

Однако, несмотря на простоту построения, в процессе технической реализации и дальнейшей эксплуатации КРМ возникают сложности, связанные с обеспечением идентичности каналов по амплитудным, частотным и фазовым характеристикам, нарушение которой приводит к снижению его тактико-технических характеристик или даже невозможности его применения.

При такой схеме передающего устройства КРМ требуется предусмотреть меры, позволяющие согласовать работу всех каналов формирования и прохождения сигналов: передающий модуль – ВЧ тракт - излучатель. Эти меры сводятся к обеспечению в передающем устройстве стабильности:

- частоты $f_1 = 90$ Гц и $f_2 = 150$ Гц, несущей для формирования суммарного и разностного сигналов в обоих угловых секторах;
- фазы ВЧ-сигналов, излучаемых всеми излучателями антенной решетки в пределах полосы частот обоих каналов;
- излучаемой мощности и глубины модуляции ВЧ-сигналов как в канале формирования зоны действия КРМ, заданной требованиями ИКАО, так и в канале, обеспечивающем высокую точность получения угловых направлений;
- закона изменения модулирующего сигнала.

Нарушение стабильности хотя бы одного из перечисленных параметров ВЧ-сигнала приводит к разрушению или существенному ухудшению требуемого распределения электромагнитного поля зоны действия КРМ [10, 11].

В работах [10–12] рассматриваются вопросы выравнивания фазового фронта антенной системы КРМ. Однако наиболее общим подходом к решению задач стабилизации в устройствах КРМ, отмеченных выше, является получение текущих оценок частоты, относительной нестационарности частоты формируемых в передающем устройстве КРМ сигналов.

С учетом вышесказанного цель работы состоит в разработке алгоритма стабилизации частоты и синхронизации генераторов передающего оборудования КРМ.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЧ-СИГНАЛОВ МНОГОКАНАЛЬНОГО ПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА КУРСОВОГО РАДИОМАЯКА

Представим формируемый в каждом канале передающего устройства сигнал следующим соотношением:

$$u_n^{(i)}(t) = U_n^{(i)}(t) \cos\left(2\pi \cdot \Psi_n^{(i)}(t)\right), (n = 1, \dots, N), \quad (1)$$

в котором $U_n^{(i)}$ и $\Psi_n^{(i)}(t)$ - соответственно амплитуда и фаза формируемого сигнала в n -м канале на частоте f_i ; N - общее число каналов генерации ВЧ-сигналов, зависящее от числа излучателей в передающей антенне.

Для решения задачи обеспечения стабильности частоты и синфазности формируемых сигналов будем проводить измерения их фазы в течение нескольких последовательных измерительных интервалов номинальной длительности t_0 каждый. Это может быть выполнено путем введения в каждый канал формирования ВЧ-сигналов направленного ответвителя мощности с малым коэффициентом связи. С выхода ответвителя мощности сигналы подаются на измеритель фаз, имеющий N информационных входов и один вход для задания длительности измерительного интервала, необходимые для получения оценок фазы, текущей частоты и относительной нестационарности частоты.

Учитывая физическую независимость каналов передающих устройств на частотах f_i ($i = 1, 2$) и наличие в каждом канале собственных дестабилизирующих факторов, влияющих на усиливаемый ВЧ-сигнал, определим значения фазы сигналов, измеряемых в течение некоторого измерительного интервала номинальной длительностью t_0 , в виде:

$$\Psi_n^{(i)} = \Psi_{0,n}^{(i)} + f_{0,n}^{(i)} \cdot \Delta t + \left(\Delta f_n^{(i)}(t) + \delta f_n^{(i)}\right) \cdot t_0, (n = 1, \dots, N), \quad (2)$$

где $\Psi_n^{(i)}$ - измеренное значение фазы i -го ВЧ-сигнала в n -м канале; $\Psi_{0,n}^{(i)}(t)$ и $f_{0,n}^{(i)}$ - соответственно номинальное значение фазы и частоты i -го ВЧ-сигнала в n -м канале, приведенные в руководстве по эксплуатации РМК; Δt - отклонение длительности t интервала измерений от номинального значения t_0 ; $\Delta f_n^{(i)}$ - отклонение текущей (на интервале измерений) частоты i -го ВЧ-сигнала от среднего значения частоты в n -м канале; $\delta f_n^{(i)}$ - отклонение среднего значения частоты i -го ВЧ-сигнала от соответствующего номинального значения, определяемого техническими характеристиками изготовленного устройства.

Значения $\Psi_{0,n}^{(i)}(t)$ и $f_{0,n}^{(i)}$ для обеих частот всех модулей хранятся в памяти запоминающих устройств (ЗУ), входящих в состав устройства стабильности фазы ВЧ-сигналов передатчиков.

С учетом (2) отклонение частоты n -го генератора от номинального значения в наиболее общей форме может быть представлено в виде [13–16]:

$$\Delta f_n^{(i)} = \frac{\Delta \Psi_n^{(i)} - f_n^{(0)} \cdot \Delta t}{t_0} - 2\delta f_n^{(i)}, \quad (3)$$

где $\Delta \Psi_n^{(i)} = \Psi_n^{(i)} - \Psi_{0,n}^{(i)}$.

Плотность распределения отклонений частоты n -го генератора принимается подчиненной нормальному закону распределения [14] и определяется выражением:

$$p(\Delta f_n^{(i)}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{0,n}^{(i)}} \exp \left[-\frac{(\Delta \Psi_n^{(i)} - f_{0,n}^{(i)} \cdot \Delta t - 2\delta f_n^{(i)} \cdot t_0)^2}{2(\sigma_n^{(i)})^2 \cdot t_0^2} \right], \quad (4)$$

где $\sigma_n^{(i)}$ - нестабильность частоты, отличающаяся от приведенного в руководстве по эксплуатации РМК значения $\sigma_{0,n}^{(i)}$.

Соотношение (4) связывает между собой средние значения частоты и относительной нестабильности формируемых сигналов, отклонения длительности временного интервала измерений с результатами измерений фазы сигналов. Общее число оцениваемых параметров в этом случае равно $4N + 1$, а число выполненных измерений составляет $2N$.

Получение требуемых оценок параметров генераторов, которые минимизируют квадраты невязок в (2), может быть проведено с использованием метода наименьших квадратов [17], при этом число уравнений должно превышать число неизвестных. Это достигается проведением измерений не на одном измерительном интервале, а нескольких, число которых M удовлетворяет условию:

$$2M \cdot N > 4N + M. \quad (5)$$

При записи соотношения (5) было учтено, что при проведении измерений фазы во всех каналах величины $\delta f_n^{(i)}$ и $\sigma_n^{(i)}$ ($n = 1, \dots, N$, $i = 1, 2$) остаются постоянными, а изменяется только длительность измерительного интервала t_m ($m = 1, \dots, M$).

С учетом закона распределения (4) и условия (5) логарифмическая функция правдоподобия, зависящая от всех оцениваемых параметров Δt_m , $\delta f_n^{(i)}$ и $\delta \sigma_{0,n}^{(i)}$, может быть представлена в виде [18]:

$$\begin{aligned} L(\Delta t, \delta f, \delta \sigma) &= \ln \prod_{n=1}^N \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{0,n}} \exp \left[-\frac{(\Delta \Phi_n - f_n^{(0)} \cdot \Delta t_m - 2\delta f_n \cdot t_0)^2}{2\sigma_{0,n}^2 \cdot t_0^2} \right] \right\} = \\ &= \sum_{n=1}^N \left\{ -\ln(\sqrt{2\pi}\sigma_{0,n}) - \frac{(\Delta \Phi_n - f_n^{(0)} \cdot \Delta t_m - 2\delta f_n \cdot t_0)^2}{2\sigma_{0,n}^2 \cdot t_0^2} \right\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\Delta \mathbf{t} = \{\Delta t_1, \dots, \Delta t_M\}$; $\delta \mathbf{f} = \{\delta f_1, \dots, \delta f_N\}$; $\delta \boldsymbol{\sigma} = \{\delta \sigma_1, \dots, \delta \sigma_N\}$ - оценки отклонений соответствующих параметров от заявленных технических характеристик.

Указанные оценки могут быть получены из условия максимума функции (6), что приводит к решению системы $4N + M$ уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(\Delta \mathbf{t}, \delta \mathbf{f}, \delta \boldsymbol{\sigma})}{\partial \Delta t_m} = 0, m = 1, \dots, M, \\ \frac{\partial L(\Delta \mathbf{t}, \delta \mathbf{f}, \delta \boldsymbol{\sigma})}{\partial \delta f_n} = 0, n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M, \\ \frac{\partial L(\Delta \mathbf{t}, \delta \mathbf{f}, \delta \boldsymbol{\sigma})}{\partial \delta \sigma_n} = 0, n = 1, \dots, N, m = 1, \dots, M. \end{cases} \quad (7)$$

Частные производные логарифмической функции правдоподобия из системы уравнений (7) легко вычисляются, но из-за громоздкости в статье не приводятся.

Полученные значения поправок $\delta \mathbf{f} = \{\delta f_1, \dots, \delta f_N\}$ и $\delta \boldsymbol{\sigma} = \{\delta \sigma_1, \dots, \delta \sigma_N\}$ в процессе работы канала передатчика в случае необходимости могут использоваться как корректирующие поправки, обеспечивающие коррекцию параметров модулирующих сигналов, направленную на компенсацию нестабильности значений фазы и частоты ВЧ-сигнала. Практическая реализация таких устройств может быть выполнена на основе синтезаторов частот различных типов, в частности синтезаторов частот с дробно-переменным коэффициентом деления [19–22].

АНАЛИЗ ДОСТИГАЕМОГО ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ ВЧ-СИГНАЛОВ В ПЕРЕДАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ КУРСОВОГО РАДИОМАЯКА

Анализ повышения стабильности частот рассмотрим для наиболее важного с практической точки зрения случая, при котором различием относительных нестабильностей частот в устройствах генерации можно пренебречь. В этом случае, как показано в [13–16], на каждом измерительном интервале достаточно оценить только нестабильность временного интервала измерений, а отклонение частоты ВЧ-сигнала определяется с использованием выражения (2) или (3). Получаемая оценка отклонения частоты в n -канале, с использованием которой проводится коррекция частоты, определяется соотношением:

$$\Delta \hat{f}_n^{(0)} = \frac{1}{2\pi \cdot t_0} \left\{ \frac{\Delta \Psi_n^{(i)} - 2\pi \cdot f_{0,n}^{(i)} \cdot \sum_{p=1}^N (\Delta \Psi_p^{(i)} - 2\pi \cdot f_{0,p}^{(i)} \cdot t_0) \cdot (\sigma_p^{(i)})^{-2} \cdot (f_{0,p}^{(i)})^{-1}}{\sum_{p=1}^N (\sigma_p^{(i)})^{-2}} \right\}. \quad (8)$$

При одинаковых номинальных параметрах устройств генерации относительная нестабильность частоты в соответствии с (8) и результатами, приведенными в [13–16], уменьшается в $\sqrt{N}$. Это позволяет для КРМ *Loc 2700* с 16 излучателями обеспечить повышение стабильности частоты и синхронизации фаз сигналов в четыре раза, в частности:

- отклонение несущей частоты от заданной, не более $\pm 0,0005\%$;
- точность настройки разности частот, не более $0,025$ кГц;

- отклонение модулирующих частот $f_1 = 90$ Гц и $f_2 = 150$ Гц от номинальных значений, не более $\pm 0,125\%$;

- синхронизация демодулированных сигналов $f_1 = 90$ Гц и $f_2 = 150$ Гц относительно фазы сигнала $f_2 = 150$ Гц, не более $\pm 0,25^\circ$;

- синхронизации по фазе сигналов $f_1 = 90$ Гц и $f_2 = 150$ Гц различных несущих, не более $\pm 0,25^\circ$;

- долговременная нестабильность частоты несущей и сигналов $f_1 = 90$ Гц и $f_2 = 150$ Гц, не более $\pm 0,0005\%$ и $\pm 0,125\%$ соответственно.

Это позволяет повысить точность формирования суммарной и разностной диаграмм направленности и соответственно установки линии курса в направлении взлетно-посадочной полосы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в ходе исследований результаты показывают:

1. При многоканальной схеме построения передающего устройства радиомаяка возможно использование статистического метода стабилизации частоты и синхронизации фаз ВЧ-сигналов, основанного на одновременном измерении фаз сигналов, формируемых в каждом канале передающей части КРМ и последующем оценивании отклонения частоты сигнала от заданной на основе соотношения (8).

2. Для контроля работоспособности и компенсации возникающих нестабильностей выходных ВЧ-сигналов передающего устройства в его состав необходимо ввести устройства (системы) контроля и управления, функционирующие на основе предложенного алгоритма оценивания параметров формируемых ВЧ-сигналов. Получаемый выигрыш в повышении стабильности частоты и точности синхронизации фаз сигналов определяется числом каналов КРМ N и равен $\sqrt{N}$.

3. Повышение стабильности частоты и точности синхронизации ВЧ-сигналов позволяет повысить точность формирования суммарной и разностной диаграмм направленности и соответственно установки линии курса в направлении взлетно-посадочной полосы. Кроме того, на основе полученных значений оценок параметров частоты и относительной нестабильности формируемых ВЧ-сигналов может приниматься решение о состоянии контролируемого параметра по критерию НОРМА – УХУДШЕНИЕ – АВАРИЯ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Борисов Е.Г.** Совместная обработка измерений в дальномерно-доплеровской многопозиционной радиолокационной системе // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 2. С. 8–19. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-2-8-19
2. **Ивенин И.Б., Курилёнок А.С.** Оптимальное управление трафиком воздушных судов, следующих в аэродромной зоне на посадку // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 2. С. 22–31. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-22-31
3. **Жильцов И.Е., Митрофанов А.К., Рудельсон Л.Е.** Оценка пропускной способности в задаче совместного планирования потоков воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 2. С. 83–95. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-83-95
4. **Завалишин О.И.** О двухсозвездных GBAS // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 3. С. 37–46. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-37-46
5. **Борисов Е.Г.** Определение местоположения воздушных объектов в полистатической радиолокационной системе, паразитирующей на излучении телекоммуникационных систем //

Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 5. С. 105–116. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-105-116

6. Рудельсон Л.Е., Смородский С.Н., Чернышева В.А. Динамическая дисциплина формирования потоков при совместном использовании общесистемной информации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 6. С. 79–91. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-79-91

7. Чинючин Ю.М., Белкин В.А. Математические аспекты оптимизации работы авиационных двигателей по критерию минимального расхода топлива на этапе снижения воздушного судна // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 97–106.

8. Чехов И.А. Пути развития систем навигации в рамках внедрения концепции CNS/ATM // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 98–106. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-98-106

9. Воробьев В.В., Власова А.В. Роль радиоэлектронного оборудования в управлении безопасностью полетов при реализации глобального аэронавигационного плана ИКАО // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 156–161. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-156-161

10. Костенко П.И., Левченко А.Н., Акулов Г.А. Вариант построения схемы выравнивания фазового фронта линейной антенной решетки системы курсового радиомаяка // Инновационные аспекты развития гражданской авиации: сборник трудов Международной научно-практической конференции (Авиатранс-2016). Ростов-на-Дону, 31 марта–1 апреля 2016 г. Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «Фонд науки и образования», 2016. С. 189–193.

11. Войтович Н.И., Жданов Б.В. Способ регулировки информационного параметра курсо-гладких радиомаяков и устройства его реализации (варианты). Патент RU № 2695316 С 2. 23.07.2019 г.

12. Зотов А.В., Жданов Б.В., Войтович Н.И. Диаграммы направленности антенны курсового радиомаяка ILS на поверхности с поперечным уклоном // Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2014. Т. 14, № 4. С. 5–27.

13. Габриэльян Д.Д., Костенко П.И., Сафарьян О.А. Вопросы стабилизации частоты и синхронизации сигналов в распределенных информационно-измерительных системах // Актуальные аспекты развития воздушного транспорта: сборник трудов Международной научно-практической конференции (Авиатранс 2019). Ростов-на-Дону, 21–23 июня. 2019 г. Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью «Фонд науки и образования», 2019. Т. 2. С. 595–603.

14. Габриэльян Д.Д., Костенко П.И., Сафарьян О.А. Особенности использования статистического метода стабилизации частоты генераторов в распределенных информационно-измерительных системах // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 6. С. 75–85. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-75-85

15. Габриэльян Д.Д. Метод оценки частот в системе генераторов / Д.Д. Габриэльян, А.А. Прыгунов, А.Г. Прыгунов, О.А. Сафарьян // Физические основы приборостроения. 2012. Т. 1, № 2. С. 72–77.

16. Safaryan O. Method of reducing phase noise in the system simultaneously and independently operating the high-frequency signal generators / O. Safaryan, I. Sakharov, N. Boldyrikhin, I. Yengibaryan // Engineering Computations. 2017. Vol. 34, no. 8 (2). Pp. 2586–2594.

17. Мазмишвили А.И. Теория ошибок и метод наименьших квадратов. М.: Недра, 1978. 312 с.

18. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы. М.: Изд-во Наука, 1974. 832 с.

19. Белов Л.А. Формирование стабильных частот и сигналов: учеб. пособие. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 224 с.

20. Шахтарин Б.И., Качармина Е.Г., Вельтищев В.В. Анализ синтезатора частот с дробно-переменным коэффициентом деления делителя // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 2. С. 122–131. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-122-131

21. Быков А.А., Сидоркин Ю.А., Ковальчук А.А. Применение сигма-дельта модуляторов в дробных синтезаторах частоты // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2011. № 2. С. 77–83.

22. Шахтарин Б.И., Быков А.А. Сигма дельта модулятор // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 158. С. 156–161.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Габриэльян Дмитрий Давидович, доктор технических наук, профессор, заместитель начальника НТК по науке ФГУП «РНИИРС», d.gabrielyan2011@yandex.ru.

Костенко Петр Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры авиационного электрорадиоприборного оборудования Ростовского филиала МГТУ ГА, pit.kostenko.73@mail.ru.

Сафарьян Ольга Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры кибербезопасности информационных систем Донского государственного технического университета, safari_2006@mail.ru.

INCREASING FREQUENCY STABILITY OF HF SIGNALS IN THE TRANSMITTING DEVICE OF THE LOCALISER BASED ON STATISTICAL ESTIMATION OF PHASES

Dmitriy D. Gabrielyan¹, Petr I. Kostenko², Olga A. Safaryan³

¹*FSUE "Rostov-On-Don NIIRS", Rostov-on-Don, Russia*

²*Rostovsky Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Rostov-On-Don, Russia*

³*FSBI "Don State Technical University", Rostov-On-Don, Russia*

The study was conducted with support of the Russian Foundation for Basic Research, grant № 19-01-00151/20

ABSTRACT

The article based on the method of statistical frequency stabilization deals with the issues of increasing frequency stability and synchronization of the forming HF signals in a transmitting device of a localizer using a multichannel variant of construction. It was demonstrated that the available digital unit of frequency and phase correction allows easy application of the proposed method. Two main features of the localizer operation affecting frequency stability and phase synchronization of HF signals are noted. The first factor is determined by deviation of the present i -HF signal frequency (on the measurement interval) from the average $\Delta f_n^{(i)}$ frequency value in n -channel. The second one is related to average frequency variation of each of the forming HF signals and its deviation within the $\delta f_n^{(i)}$ value from the nominal value during localizer operation. On the basis of HF signals description in channels of the transmitting device of a localizer ratios are obtained determining optimal values in terms of the method of least square method as $\delta f_n^{(i)}$ deviations of the present frequency values from the average value as well as variations of average frequency values during localizer operation. The article considers the most significant, from an applicatory point of view, case of assessment covering only deviations of the present HF signals frequency values from the average value on the measurement interval. It is shown that application of the method of statistical frequency stabilization allows the transmitting device of a localizer including N channels of HF signals formation to increase frequency stability and HF signals phase synchronization $\sqrt{N}$ times.

That enables to improve accuracy of forming integrated and difference directivity diagrams and setting heading in the runway direction as well. Apart from that, on the basis of the received values of frequency parameters estimation and relative instability of the forming HF signals a decision can be made about the condition of the controlled parameter by the criterion STANDARD-DETERIORATION-ACCIDENT.

Key words: localizer, antenna array, HF signal, frequency stability, phase synchronization, estimates of frequency and phase deviation from nominal values.

REFERENCES

1. **Borisov, E.G.** (2020). *Joint processing of measurements in a rangefinder-doppler multi-static radar system*. Civil Aviation High Technologies, vol. 23, no. 2, pp. 8–19. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-2-8-19. (in Russian)
2. **Ivenin, I.B. and Kurilenok, A.S.** (2018). *Optimal traffic management for aircraft approaching the aerodrome landing area*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 2, pp. 22–31. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-22-31. (in Russian)
3. **Zhiltsov, I.E., Mitrofanov, A.K. and Rudelson, L.E.** (2018). *Air space capacity assessment regarding the problem of the collaborative management of air traffic flows*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 2, pp. 83–95. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-83-95. (in Russian)
4. **Zavalishin, O.I.** (2018). *About two-star GBAS*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 3, pp. 37–46. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-37-46. (in Russian)
5. **Borisov, E.G.** (2018). *Determination of the location of air objects in polistatic radar system parasitising on radiation telecommunication systems*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 5, pp. 105–116. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-105-116. (in Russian)
6. **Rudelson, L.E., Smorodsky, S.N. and Chernysheva, V.A.** (2018). *Dynamic discipline of parallel service in concept flight and flow-information for a collaborative environment*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 6, pp. 79–91. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-79-91. (in Russian)
7. **Chinyuchin, Yu.M. and Belkin, V.A.** (2017). *Mathematical aspects of aircraft engines running optimization for minimum fuel consumption while landing*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 1, pp. 97–106. (in Russian)
8. **Chekhov, I.A.** (2017). *Ways of navigation systems development within the implementation of the cns/atm concept*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 98–106. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-98-106. (in Russian)
9. **Vorobyov, V.V. and Vlasova, A.V.** (2017). *The role of navigational aids in flight safety management within icao global air navigation plan*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 156–161. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-156-161. (in Russian)
10. **Kostenko, P.I., Levchenko, A.N. and Akulov, G.A.** (2016). *Variant postroyeniya skhemy vyravnivaniya fazovogo fronta lineynoy antennoy reshetki sistemy kursovogo radiomayaka* [Variant of constructing the scheme of alignment of the phase front of the linear antenna array of the course beacon system]. Innovatsionnyye aspekty razvitiya grazhdanskoy aviatsii: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Aviatrans-2016) [Innovative aspects of civil aviation development: materials of the International scientific and practical conference (Aviatrans-2016)]. Rostov-on-Don: OOO «Fond nauki i obrazovaniya», pp. 189–193. (in Russian)
11. **Vojtovich, N.I. and Zhdanov, B.V.** (2019). *Method for adjusting information parameter of course-glide path beacons and its implementation device (embodiments)*. Patent RU, no. 2695316 C 2, July 23, 2019. (in Russian)
12. **Zotov, A.V., Zhdanov, B.V. and Voytovich, N.I.** (2014). *Antenna pattern of ils localizer on the surface with transverse-slope*. Bulletin of the south ural state university. Series: computer technologies, automatic control, radio electronics, vol. 14, no. 4, pp. 5–27. (in Russian)

13. Gabrielyan, D.D., Kostenko, P.I. and Safaryan, O.A. (2019). *Voprosy stabilizatsii chastoty i sinkhronizatsii signalov v raspredelennykh informatsionno-izmeritelnykh sistemakh* [Questions of frequency stabilization and signal synchronization in distributed information and measurement systems]. Aktualnyye aspekty razvitiya vozdušnogo transporta: sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Aviatrans-2019) [Relevant aspects of air transport development: materials of the International scientific and practical conference (Aviatrans 2019)]. Rostov-on-Don: ООО «Fond nauki i obrazovaniya», vol. 2, pp. 595–603. (in Russian)

14. Gabrielyan, D.D., Kostenko, P.I. and Safaryan, O.A. (2019). *Features of the use of the statistical method of frequency stabilization of generators in distributed information-measuring systems*. Civil Aviation High Technologies, vol. 22, no. 6, pp. 75–85. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-75-85. (in Russian)

15. Gabrielyan, D.D., Prygunov, A.A., Prygunov, A.G. and Safarian, O.A. (2012). *Method of estimating frequency generator system*. Physical Bases of Instrumentation, vol. 1, no. 2, pp. 72–77. (in Russian)

16. Safaryan, O., Sakharov, I., Boldyrikhin, N. and Yengibaryan, I. (2017). *Method of reducing phase noise in the system simultaneously and independently operating the high-frequency signal generators*. Engineering Computations, vol. 34, no. 8 (2), pp. 2586–2594.

17. Mazmishvili, A.I. (1978). *Teoriya oshibok i metod naimenshikh kvadratov* [Theory of errors and method of least squares]. Moscow: Nedra, 312 p. (in Russian)

18. Korn, G. and Korn, T. (1977). *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov: Opredeleniya, teoremy, formuly* [Handbook of mathematics for researchers and engineers: Definitions, theorems, formulae]. Moscow: Izdatelstvo Nauka, 832 p. (in Russian)

19. Belov, L.A. (2005). *Formirovaniye stabilnykh chastot i signalov: uchebnoye posobiye* [Forming stable frequencies and signals: a tutorial]. Moscow: Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 224 c. (in Russian)

20. Shakhtarin, B.I., Kacharina, E.G. and Veltischev, V.V. (2018). *Analysis of fractional-n frequency synthesizers*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 2, pp. 122–131. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-122-131. (in Russian)

21. Bykov, A.A., Sidorkin, Yu.A. and Kovalchuk, A.A. (2011). *Primeneniye sigma-delta modulyatorov v drobnykh sintezatorakh chastoty* [Application of Sigma-Delta modulators in fractional frequency synthesizers]. Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering, no. 2, pp. 77–83. (in Russian)

22. Shakhtarin, B.I. and Bykov, A.A. (2010). *Sigma delta modulator*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, vol. 158, pp. 156–161. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriy D. Gabrielyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of STC in Science, FSUE Rostov Radio-Communication Research Institution. gabrieljan2011@yandex.ru.

Petr I. Kostenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Airborne Electrical Radio Equipment, Rostov Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, pit.kostenko.73@mail.ru.

Olga A. Safaryan, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Cyber Security of Information Systems, Don State Technical University, safari_2006@mail.ru.

Поступила в редакцию 04.07.2020
Принята в печать 24.09.2020

Received 04.07.2020
Accepted for publication 24.09.2020