

А.С. Слесарев

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ПЕТЛЕВОГО ФИЛЬТРА КОНТУРА ФАПЧ С АСТАТИЗМОМ ВТОРОГО ПОРЯДКА СИСТЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ СПУТНИКОВЫХ КОМАНДНО-ПРОГРАММНЫХ РАДИОЛИНИЙ

Произведено обоснование критерия оптимальности петлевого фильтра контура ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка спутниковых командно-программных радиолоний при наличии линейно изменяющегося доплеровского сдвига частоты. Осуществлена оптимизация коэффициентов петлевого фильтра для различных значений отношений сигнал-шум. Показано, что петлевой фильтр, оптимизированный для отношения сигнал-шум -25 дБ, обеспечивает наилучшую устойчивость к изменению отношения сигнал-шум в диапазоне от -30 дБ до -10 дБ.

Введение. Одним из основных элементов систем фазовой синхронизации приемников спутниковых командно-программных радиолоний (КПРЛ) является контур фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Современные КПРЛ характеризуются низким отношением сигнал-шум, наличием изменяющегося во времени доплеровского сдвига частоты и других мешающих факторов, что обуславливает рост фазовой ошибки в контуре ФАПЧ [1]. Поэтому задача повышения устойчивости контура ФАПЧ систем синхронизации спутниковых КПРЛ к действию мешающих факторов в настоящее время весьма актуальна.

К современным системам фазовой синхронизации спутниковых КПРЛ предъявляются противоречивые требования по уменьшению ошибки слежения и снижению времени установления режима синхронизма. Это приводит к необходимости оптимизации контура ФАПЧ по нескольким показателям качества, включающим фазовую ошибку и время установления режима синхронизма. Кроме того, широкий диапазон изменения условий работы приемников спутниковых КПРЛ обуславливает потребность в придании робастных свойств системе фазовой синхронизации.

В [2, 3] приводятся результаты синтеза оптимального петлевого фильтра контура ФАПЧ при наличии аддитивного белого шума и постоянного доплеровского сдвига частоты, приводящего к системе с астатизмом 2-го порядка, а также при линейно изменяющемся доплеровском сдвиге, что приводит к системе с астатизмом 3-го порядка. Достоинство системы ФАПЧ 3-го порядка – нулевое значение установившейся

динамической ошибки по фазе при линейном изменении частоты Доплера. Однако такие системы, в отличие от систем ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка, не всегда устойчивы и более сложны в анализе [1], поэтому часто используются системы ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка.

Цель работы – оптимизация передаточной функции петлевого фильтра контура ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка по нескольким показателям качества, а также обеспечение робастности к изменению условий приема.

Обоснование показателей качества контура ФАПЧ. В современных космических КПРЛ чаще всего используются фазоманипулированные (ФМн) сигналы. Система синхронизации приемника ФМн-сигналов содержит контур ФАПЧ в виде петли Костаса [4]. На рисунке 1 представлена структурная схема линейной модели петли Костаса.

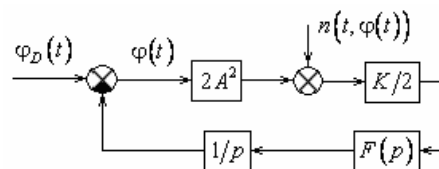


Рисунок 1 – Структурная схема линейной модели петли Костаса

Структурная схема, представленная на рисунке 1, описывается следующим уравнением:

$$\varphi(t) = \varphi_D(t) \frac{P}{p + KA^2F(p)} - n(t, \varphi(t)) \frac{KF(p)/2}{p + KA^2F(p)}, \quad (1)$$

где $\varphi(t)$ - фазовая ошибка в контуре ФАПЧ, $\varphi_D(t)$ - сумма начальной фазы, фазы за счет постоянной и линейно изменяющейся составляющих доплеровского сдвига частоты ФМн-сигнала, K - коэффициент усиления петли, A - амплитуда ФМн-сигнала, $F(p)$ - передаточная функция петлевого фильтра, $n(t, \varphi(t))$ - эквивалентный фазовый шум, спектральная плотность мощности (СПМ) которого равномерна в полосе контура ФАПЧ и зависит от уровня шума и амплитуды A сигнала [4].

Зависимость доплеровского сдвига частоты сигнала спутниковой КПРЛ от времени на периодах, сравнимых с постоянной времени контура ФАПЧ, можно считать линейной, особенно если не рассматривать малые значения угла места спутника. Тогда выражение для фазы $\varphi_D(t)$ принимает вид:

$$\varphi_D(t) = \varphi_0 + \omega_D t + \omega'_D t^2 / 2,$$

где φ_0 - начальная фаза ФМн-сигнала, ω_D - постоянная составляющая доплеровского сдвига частоты, ω'_D - скорость линейного изменения доплеровского сдвига частоты.

Петлевой фильтр контура ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка представляет собой пропорционально-интегрирующее звено с передаточной функцией [3]:

$$F(p) = (p\alpha_2 + 1) / (p\alpha_1),$$

где α_1 и α_2 - коэффициенты петлевого фильтра.

Из анализа выражения (1) следует, что фазовая ошибка в контуре ФАПЧ складывается из флуктуационной ошибки из-за наличия аддитивного шума и установившейся динамической ошибки вследствие присутствия доплеровского сдвига частоты.

Выражение для дисперсии флуктуационной ошибки в контуре ФАПЧ в виде петли Костаса определяется выражением:

$$\sigma_\varphi^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\left[\left(\frac{K}{2\alpha_1} \right)^2 + \left(\frac{\omega K \alpha_2}{2\alpha_1} \right)^2 \right] S_n(\omega)}{\left(\frac{KA^2}{\alpha_1} - \omega^2 \right)^2 + \left(\frac{\omega KA^2 \alpha_2}{\alpha_1} \right)^2} d\omega, \quad (2)$$

где $S_n(\omega)$ - СПМ эквивалентного фазового шума $n(t, \varphi(t))$. При увеличении отношения сигнал-шум уровень $S_n(\omega)$ повышается, увеличивая σ_φ^2 .

Установившаяся динамическая ошибка в результате линейного изменения доплеровского

сдвига частоты сигнала в петле Костаса определяется выражением:

$$\varphi_s = \omega'_D \alpha_1 / (KA^2). \quad (3)$$

Введем показатель качества, учитывающий обе составляющие фазовой ошибки в контуре ФАПЧ:

$$\delta_\Sigma = \sigma_\varphi + \varphi_s. \quad (4)$$

Другим показателем качества контура ФАПЧ является время установления режима синхронизма, которое в случае астатизма 2-го порядка может быть оценено с помощью выражения [1]:

$$t_s \approx 16\alpha_1 / \left(K\alpha_2 \left(1 + \alpha_1 / (K\alpha_2^2) \right) \right). \quad (5)$$

Таким образом, для повышения устойчивости контура ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка системы синхронизации приемника спутниковой КПРЛ необходимо произвести оптимизацию коэффициентов α_1 и α_2 петлевого фильтра по двум показателям качества: δ_Σ и t_s . Данные показатели качества имеют стандартный вид, т.е. являются неотрицательными, и качество контура ФАПЧ обратно пропорционально δ_Σ и t_s [5].

Обоснование критерия оптимальности.

Поскольку производится оптимизация по двум показателям качества, вводится результирующий показатель качества k_r в виде взвешенной суммы [5]:

$$k_r = \lambda \delta_{\Sigma \text{ норм}} + (1 - \lambda) t_{s \text{ норм}}, \quad (6)$$

где λ - весовой коэффициент; $\delta_{\Sigma \text{ норм}} = \delta_\Sigma / \delta_{\Sigma \text{ max}}$; $t_{s \text{ норм}} = t_s / t_{s \text{ max}}$; $\delta_{\Sigma \text{ max}}$ и $t_{s \text{ max}}$ - максимально допустимые значения показателей качества δ_Σ и t_s соответственно. Исходя из линейности модели контура ФАПЧ было выбрано значение $\delta_{\Sigma \text{ max}} = 30^\circ$ [4], а из типовых характеристик контуров ФАПЧ КПРЛ - $t_{s \text{ max}} = 0,4$ с. Выбор значения λ является субъективным и зависит от особенностей применения конкретной КПРЛ. В данной работе важность обоих показателей качества контура ФАПЧ считалась одинаковой, поэтому $\lambda = 0,5$.

Поскольку результирующий показатель качества k_r имеет стандартный вид, соответствующий ему критерий оптимальности определяется выражением:

$$k_{r \text{ min}} = \min_{\alpha_1, \alpha_2} (\lambda \delta_{\Sigma \text{ норм}}(\alpha_1, \alpha_2) + (1 - \lambda) t_{s \text{ норм}}(\alpha_1, \alpha_2)). \quad (7)$$

Оптимизация коэффициентов петлевого фильтра. В соответствии с критерием опти-

мальности (7) наилучшими являются значения коэффициентов α_1 и α_2 петлевого фильтра, обеспечивающие минимум результирующего показателя качества k_r . С этой целью для различных значений отношения сигнал-шум в соответствии с выражениями (2)-(6) были рассчитаны зависимости δ_Σ от t_s , а затем определена пара значений δ_Σ и t_s , минимизирующая величину k_r . На рисунке 2 приведены рассчитанные зависимости результирующего показателя качества k_r от времени установления режима синхронизма t_s при различных значениях отношения сигнал-шум q , при этом ось ординат имеет логарифмический масштаб.

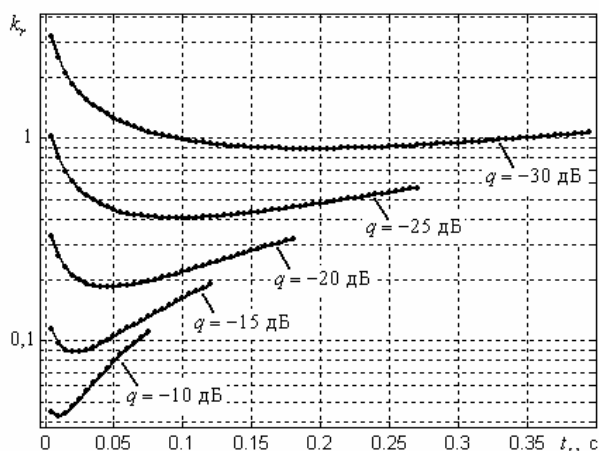


Рисунок 2 – Зависимости результирующего показателя качества от времени установления режима синхронизма

Расчет производился при значении скорости линейного изменения доплеровского сдвига частоты $\omega'_D = 60$ рад/с², являющегося типичным для среднеорбитальных спутниковых систем связи (ELLIPSO, Inmarsat, Odyssey) при малоподвижном наземном приемопередатчике. Как следует из анализа зависимостей, повышение отношения сигнал-шум q приводит к уменьшению времени вхождения в синхронизм t_s и снижению оптимального значения результирующего показателя качества k_r , а значит, и фазовой ошибки в контуре ФАПЧ.

Повышение устойчивости контура ФАПЧ к изменению отношения сигнал-шум. Приемники спутниковых КПРЛ часто функционируют в условиях априорной неопределенности относительно значения отношения сигнал-шум. В связи с этим требуется выбрать значения коэффициентов α_1 и α_2 петлевого фильтра контура ФАПЧ, обеспечивающие робастность к изменению отношения сигнал-шум.

На рисунке 3 представлены зависимости результирующего показателя качества k_r от отношения сигнал-шум для коэффициентов α_1 и α_2 петлевого фильтра контура ФАПЧ, оптимизированных для различных значений отношения сигнал-шум. При этом через $\alpha_{1,2,опт}(q = L$ дБ) обозначена зависимость, построенная для петлевого фильтра, коэффициенты которого оптимизированы для отношения сигнал-шум L дБ. При усреднении каждой зависимости по всему диапазону отношений сигнал-шум минимальное среднее значение результирующего показателя качества k_r получено для $\alpha_{1,2,опт}(q = -25$ дБ).

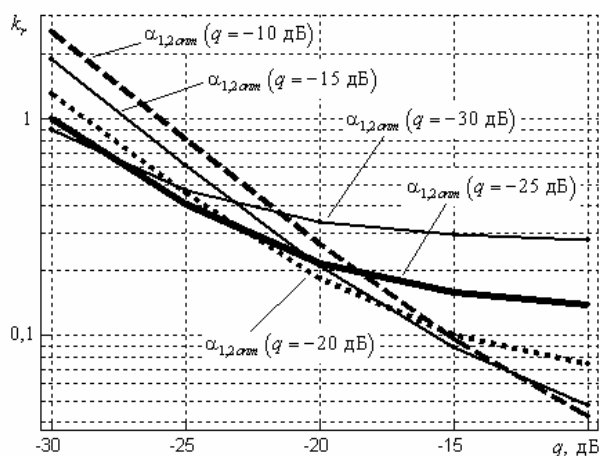


Рисунок 3 – Зависимости результирующего показателя качества от отношения сигнал-шум

Таким образом, использование коэффициентов петлевого фильтра контура ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка, оптимальных для отношения сигнал-шум -25 дБ, позволяет достичь наилучшей устойчивости к изменению отношения сигнал-шум в диапазоне от -30 дБ до -10 дБ, характерном для приемников КПРЛ со слабонаправленными антеннами в нормальных условиях, а также при ослаблении сигнала вследствие наличия препятствий, замираний и т.д.

Заключение. Таким образом, обоснован критерий оптимальности контура ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка спутниковых КПРЛ при наличии линейно изменяющегося доплеровского сдвига частоты сигнала. Произведена оптимизация коэффициентов петлевого фильтра, осуществлен выбор коэффициентов, обеспечивающих устойчивость к изменению отношения сигнал-шум в диапазоне от -30 дБ до -10 дБ.

Библиографический список

1. Цифровые радиоприемные системы: Справочник / Под ред. М.И. Жодзишского. – М.: Радио и связь, 1990. – 208 с.

2. *Tausworthe R.C.* A Second/Third Hybrid Phase-Locked Receiver for Tracking Doppler Rates. – JPL Technical Report 32-1526, Vol. 1

3. *Tausworthe R.C.* Theory and Practical Design of Phase-Locked Receivers. – JPL Technical Report 32-819, Vol. 1, 1966.

4. *Линдсей В.* Системы синхронизации в связи и управлении. – М.: Сов. радио, 1978. – 600 с.

5. *Гуткин Л.С.* Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. – М.: Сов. радио, 1975. – 368 с.