

УДК 621.396

С.О. Дейкало, С.В. Женжера

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

КОРЕКЦІЯ ФАЗОВИХ ФЛУКТУАЦІЙ ГАРМОНІЙНОГО КОЛИВАННЯ, СПОТВОРЕНОГО ВИПАДКОВО-НЕОДНОРІДНОЮ ТРОПОСФЕРОЮ З УРАХУВАННЯМ КОРЕЛЯЦІЇ МІЖ ФЛУКТУАЦІЯМИ ЙОГО АМПЛІТУДИ Й ФАЗИ

У роботі на основі урахування статистичної залежності амплітудних і фазових флуктуацій відповідно з релєївським і нормальним законами розподілу наведені результати моделювання пристрою корекції фазових флуктуацій гармонійного сигналу, у якому врахована взаємна кореляція флуктуацій амплітуди й фази. Показано, що урахування взаємної кореляції приводить до підвищення точності корекції фази й зменшенню часу, необхідного для відновлення характеристик вихідного сигналу.

Ключові слова: кореляція, флуктуації, корекція фази, розповсюдження в тропосфері.

Вступ

Більшість багатопозиційних радіотехнічних систем і радіотехнічних комплексів, що функціонують у сантиметровому діапазоні хвиль, так чи інакше зазнають впливу від приземної тропосфери. Цей вплив на інформаційні характеристики електромагнітної хвилі стає особливо помітний, якщо траси поширення проходять у самій тропосфері. При цьому відбувається часткове, а іноді й повне руйнування корисної інформації, яка закладена в параметрах електромагнітної хвилі.

З появою флуктуацій рівня й фази сигналу, виникає кореляційний зв'язок між цими флуктуаціями. Експериментально встановлено, що флуктуації амплітуди гармонійного сигналу, переданого по каналі передачі в тропосфері, добре описуються релєївським законом розподілу, а флуктуації фази – нормальним законом [1]. При цьому фаза й амплітуда виявляються статистично залежними [2].

Наявність такої залежності іноді можна використовувати для поліпшення характеристик радіотехнічної системи.

Пристрій корекції фазових флуктуацій, який враховує кореляційну залежність між флуктуаціями рівня і фази

У роботі [3] наведений пристрій корекції фазових флуктуацій для приймача синхронізуючих сигналів.

Показано, що врахування взаємної кореляції амплітуди й фази сигналу дозволяє підвищити точність, тобто зменшити мінімальну середньоквадратичну помилку відстеження фази в гетеродині, що синхронізується.

Схема пристрою, запропонована в [3], реалізує алгоритм корекції фазових флуктуацій прийнятого радіосигналу, який був спотворений при розповсюдженні в приземній тропосфері:

$$\begin{aligned} \dot{A}^* &= -\alpha_1 A^* + N_{01} [4A^*]^{-1} + \frac{2}{N_0} \left\{ R_A(t) \times \right. \\ &\times \left[y(t) \cdot \cos(\omega_0 t - \varphi^*) - \frac{A^*}{2} \right] + \\ &\left. + R_{A\varphi}(t) \cdot y(t) \cdot \sin(\omega_0 t - \varphi^*) A^* \right\}; \\ \dot{\varphi}^* &= -\alpha_2 \varphi^* + \frac{2}{N_0} \left\{ R_{A\varphi}(t) \left[y(t) \cdot \cos(\omega_0 t - \varphi^*) - \frac{A^*}{2} \right] + \right. \\ &\left. + R_{\varphi}(t) \cdot y(t) \cdot \sin(\omega_0 t - \varphi^*) A^* \right\}, \end{aligned}$$

де \dot{A}^* та $\dot{\varphi}^*$ – оцінки відповідно амплітуди й фази коливання, що обробляється.

Структура пристрою, який реалізує запропонований алгоритм [3] наведена на рис. 1.

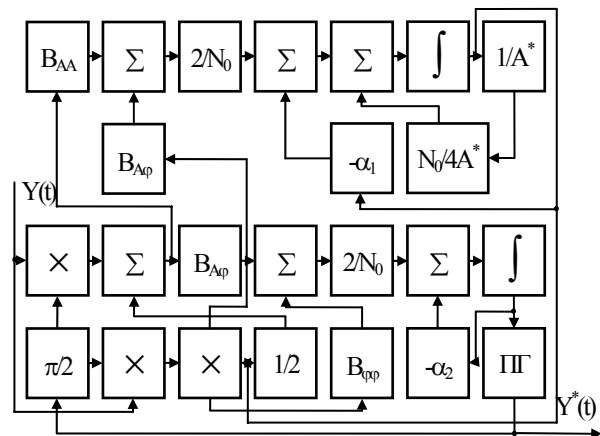


Рис. 1. Структура пристрою, який реалізує алгоритм корекції фази з урахуванням кореляційної функції

Пристрій являє собою комбінацію контуру фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), генератора, що підстроюється (ПГ) і системи автоматичного регулювання підсилення (АРП). Цей пристрій істотно відрізняється від фільтруючих схем, побу-

дованих без урахування кореляційних залежностей параметрів синхронізуючого сигналу. Відмінність виражається в наявності перехресних зв'язків, які забезпечують взаємний вплив контуру ФАПЧ і системи АРП один на одного. Використання цих перехресних зв'язків зменшує помилки фільтрації параметрів гармонійного сигналу.

Для перевірки теоретично отриманих результатів з корекції фази при корельованих флуктуаціях параметрів сигналу, який поширювався в тропосфері [3] проводилося імітаційне моделювання. Для цього використовувалася система візуального моделювання Simulink пакета прикладних програм Matlab. Було проведено моделювання сигналу, що пройшов тропосферу, побудовано модель пристрою корекції фази. Для кількісної і якісної оцінок вирашу були написані програми мовою програмування Matlab.

Моделювання флуктуаційних процесів

При проведенні моделювання статистичні характеристики сигналу, що пройшов середовище розповсюдження (інформація про амплітудні й фазові флуктуації, а також про взаємну кореляцію між ними) вибиралися з наявних експериментальних даних [1, 2], які отримані на приймальній стороні тропосферного каналу передачі інформації. Ці статистичні характеристики отримані на приймальній стороні радіоканалу, а тому при моделюванні параметри тропосфери не вводилися. У моделі гармонійного сигналу, який набув впливу тропосфери при поширенні $u(t)$, вплив адитивних завад не враховувався. Пов'язано це з тим, що мультиплікативний вплив неоднорідностей тропосфери на розповсюджуваний сигнал стає істотним при досить великих співвідношеннях сигнал/шум (більше 30), при якому вплив адитивної завади мізерно малий і цим впливом можна знехотити. Коефіцієнт взаємної кореляції між амплітудними й фазовими флуктуаціями [2] лежить у межах $K_{\Delta\phi} \in (0, 6...0, 8)$. При проведенні імітаційного моделювання $K_{\Delta\phi}$ обраний рівним 0,7.

Для формування процесу фазових флуктуацій (з нормальним законом розподілу щільності ймовірностей) за основу взятий рівномірно розподілений випадковий процес, що виробляється вбудованим генератором випадкових послідовностей пакета Matlab. З нього, на основі центральної граничної теореми

$$\xi(t) = \frac{\sqrt{12}}{n} \left(\sum_{i=1}^n a_i(t) - \frac{n}{2} \right), \quad (1)$$

де $a_i(t)$ – незалежні рівномірно розподілені випадкові процеси;

$i \in (1...n)$, $n = 6...10$ (для моделювання процесу $\xi(t)$ обрано $n = 8$), формується коливання фазових

флуктуацій $\xi(t)$, що представляє собою δ -корельований нормально розподілений випадковий процес із нульовим математичним очікуванням і одиничною дисперсією.

Для формування коливання амплітудних флуктуацій (з релєївським законом розподілу щільності ймовірностей) за основу береться два рівномірно розподілені випадкових процеси, також формуємі вбудованим генератором випадкових послідовностей пакета Matlab. З них також на основі центральної граничної теореми (1) формуються нормальні випадкові процеси з нульовим математичним очікуванням і одиничною дисперсією. Для забезпечення умови взаємної корельованості процесів амплітудних і фазових флуктуацій, у якості одного з нормальних випадкових процесів, що беруть участь у формуванні моделі амплітудних флуктуацій, розподілених за законом Релея, береться процес фазових флуктуацій $\xi(t)$. Із двох процесів з нормальними законами розподілу формується випадковий процес із релєївським законом розподілу щільності ймовірностей.

Моделювання пристрою корекції фазових флуктуацій

Формування моделі пристрою корекції необхідно здійснювати відповідно до теоретично розрахованої системи рівнянь для оцінок амплітуди \hat{A}^* і фази $\hat{\phi}^*$ та алгоритму роботи пристрою корекції, що враховує кореляцію флуктуацій амплітуди та фази, функціональна схема якого наведена на рис. 1.

Пристрій повинен містити:

– підбудовуємім генератор, що, управляється напругою $U_{\text{упр}}$ (ГУН);

– схему формування управляємої напруги $U_{\text{упр}}$ залежно від розбіжності фаз сигналу, що обробляється й коливання ГУНа.

Для формування генератора необхідно, по-перше, здійснити моделювання самого генератора, по-друге, вибрати спосіб керування ним (використовувати $U_{\text{упр}}$ для зміни частоти або фази генератора).

Генератор, керований напругою (ГУН) являє собою генератор гармонійного сигналу, частота або фаза якого перебудовується за законом керуючої напруги $U_{\text{упр}}$.

Схема формування керуючої напруги для ГУНа повинна містити в собі пристрій виділення флуктуацій амплітуди й фази, а також схему, що забезпечує взаємний вплив флуктуацій цих параметрів відповідно до коефіцієнта взаємної кореляції $\rho_{\Delta\phi}$.

Для виділення флуктуацій амплітуди за основу була взята схема автоматичного регулювання підсилення (АРП), яка зазвичай використовується в класичній схемі супергетеродинного приймача, а для

виділення флуктуацій фази – схема автопідстроювання фази (АПФ). Взаємний вплив врахований відповідно до теоретично розрахованої системи рівнянь для оцінок \dot{A}^* і $\dot{\phi}^*$ [3].

При проведенні імітаційного моделювання розглядались два способи підбудови частоти ГУНа:

- використання $U_{упр.}$ для керування фазою сигналу;
- використання $U_{упр.}$ для керування частотою сигналу.

Оцінити переваги запропонованої схеми пристрою корекції фази сигналу можна в порівнянні з іншими існуючими схемами фільтрації. Для цього була використана схема автопідстроювання фази (АПФ).

Переваги запропонованої схеми корекції фази

Для якісної оцінки виграшу, написана програма мовою програмування Matlab, що дозволяє зробити розрахунки трьох кореляційних функцій, графіки яких наведені на рис. 2:

- автокореляційна функція вихідного гармонійного сигналу;
- взаємкореляційна функція вихідного гармонійного сигналу й сигналу, який оброблено схемою, що враховує взаємну кореляцію флуктуацій амплітуди й фази;
- взаємкореляційна функція вихідного гармонійного сигналу й сигналу, обробленого схемою АПФ.

Із графіків (рис. 2) видно, що при обробці спотвореного при поширенні в тропосфері сигналу запропонованим пристроєм якість корекції, достатня для подальшої обробки коливання досягається при використанні меншого обсягу даних. Так, при обробці 3-х періодів прийнятого сигналу запропонованою схемою корекції (рис. 2, а), вихідний сигнал можна використовувати для корекції фази ($K_{кор}=0,602$, форма кореляційної функції збігається з автокореляційною). Тоді як для схеми АПФ 3-х періодів прийнятого сигналу недостатньо ($K_{кор}=0,441$, форма кореляційної функції не збігається з автокореляційною).

При обробці 6-и періодів схемою АПФ (рис. 2, б), вихідний сигнал можна використовувати для корекції фази ($K_{кор}=0,570$, форма кореляційної функції збігається з автокореляційною). Обробка 6-и періодів прийнятого сигналу запропонованим пристроєм (рис. 2, б) недоцільна. Це пов'язане з тим, що коефіцієнт кореляції при цьому змінюється незначно ($K_{кор}=0,606$).

Для кількісної оцінки виграшу, мовою програмування Matlab була написана програма обчислення повної фази досліджуваного сигналу, а також визначення статистичних характеристик отриманих оцінок. Дана програма дозволяє виділити нульові пере-

ходи трьох функцій – функції вихідного неспотвореного гармонійного сигналу й функцій сигналів, які набули впливу тропосфери й оброблених згодом двома методами (за допомогою пристрою корекції, що враховує взаємну кореляцію флуктуацій амплітуди й фази й схеми автопідстроювання фази).

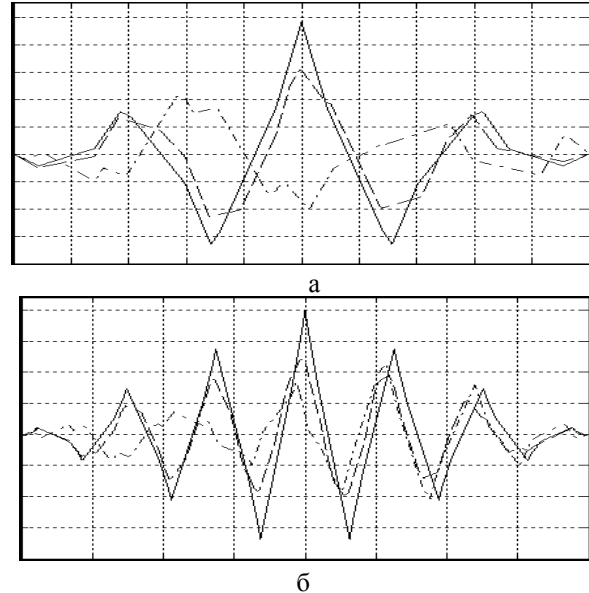


Рис. 2. Кореляційні функції вихідного сигналу:
 — автокореляційна
 - - - - - взаємкореляційна вихідного сигналу та обробленого запропонованою схемою;
 - · - · - - - - - взаємкореляційна вихідного та обробленого схемою АПФ:
 а – при обробці 3-х періодів;
 б – при обробці 6-и періодів

Також дана програма дозволяє оцінити математичні очікування й середньоквадратичні відхилення часових інтервалів t_{ij} між сусідніми "нульовими переходами", які відповідають напівперіоду хвилі, а отже можуть характеризувати оцінену фазу обробленого пристроєм корекції фази сигналу. Ці характеристики можуть служити кількісними показниками виграшу при використанні запропонованого алгоритму обробки сигналу, який набув впливу середовища поширення в порівнянні з відомими алгоритмами (у цьому випадку – зі схемою АПФ).

Оцінені програмою обробки математичні очікування (МО) і середньоквадратичні відхилення (СКО) часових інтервалів між сусідніми моментами переходів через нуль t_{ij} , представлені на графіках (рис. 3).

Висновки

При використанні схеми корекції фази, в якій враховується кореляція амплітудних та фазових флуктуацій спостерігається виграш перед відомими схемами рис. 4, з яких видно, що математичне очікування тривалостей між сусідніми нульовими переходами (повна фаза сигналу) по модулі ближче до математи-

чного очікування вихідного сигналу, чим при використанні відомої схеми АПФ (рис. 4, а), тобто оцінка повної фази при використанні запропонованої схеми, буде точнішою, ніж при використанні відомих схем (ФАПЧ, АПФ).

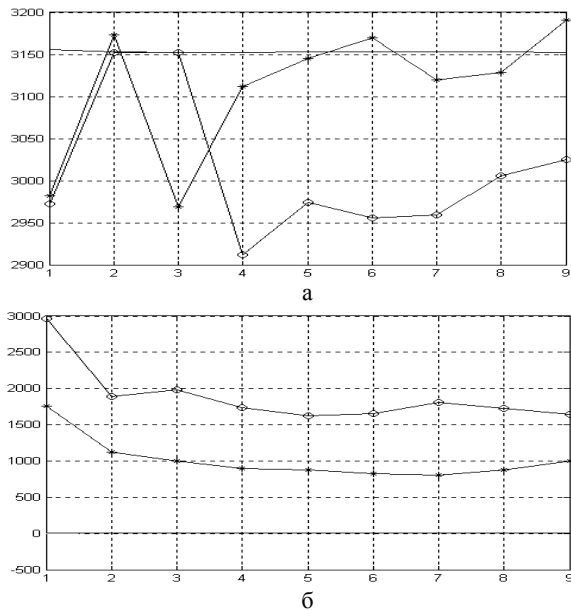


Рис. 3. Математичні очікування – а і середньоквадратичні відхилення – б часових інтервалів між сусідніми моментами переходів через нуль сигналів:
 — $S(t)$; — \times — $S_{\text{схем.}}(t)$; — \square — $S_{\text{АПФ}}(t)$

Також при використанні запропонованої схеми СКО значно менше, ніж при використанні схеми АПФ, тобто протягом тривалого часу оцінка повної фази буде більше стабільною.

Виходячи із вищесказаного видно, що кількісна і якісна оцінка корекції фази, при використанні запропонованої схеми обробки спотвореного тропосферою сигналу дає вигоду стосовно відомим і застосовуваним у цей час схемам (ФАПЧ, АПФ).

Список літератури

1. Семенов А.А. Флуктуации электромагнитных волн на приземных трассах / А.А. Семенов, Т.И. Арсеньян. – М.: Наука, 1978. – 272 с.
2. Безлюдько Г.Я. Исследование влияния приземного слоя на амплитудно-фазовые свойства радиосигнала / Г.Я. Безлюдько, А.И. Горб, Е.М. Лопаткин, В.И. Пономарев, В.В. Печенин // Радиоэлектроника летательных аппаратов. – Х.: ХАИ. – Вып. 12, 1982. – С. 135-139.
3. Дейкало С.А. Оптимальная фильтрация фазы гармонического сигнала, коррелированной с его амплитудой / С.А. Дейкало // Вісник Харківського національного університету ім. Карабіна. – 2001. – №513. – С. 141-146.

Надійшла до редколегії 21.11.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.Ю. Костенко, Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

КОРРЕКЦИЯ ФАЗОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ГАРМОНИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ, ПОДВЕРГШЕГОСЯ ВЛИЯНИЮ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНОЙ ТРОПОСФЕРЫ С УЧЕТОМ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ФЛУКТУАЦИЯМИ ЕГО АМПЛИТУДИ И ФАЗЫ

С.А. Дейкало, С.В. Женжера

В работе на основе учета статистической зависимости амплитудных и фазовых флуктуаций соответственно с релевским и нормальным законами распределения приведены результаты моделирования устройства коррекции фазовых флуктуаций гармонического сигнала, в котором учтена взаимная корреляция флуктуаций амплитуды и фазы. Показано, что учет взаимной корреляции приводит к повышению точности коррекции фазы и уменьшению времени, необходимого, для возобновления характеристик исходного сигнала.

Ключевые слова: корреляция, флуктуации, коррекция фазы, распространения, в тропосфере.

CORRECTION PHASE FLUCTUATION HARMONIC SIGNAL, WHICH BE SUBJECTED TO INFLUENCE ACCIDENTALLY-LUMPY OF TROPOSPHERE WITH PROVISION FOR CORRELATION BETWEEN FLUCTUATION OF ITS AMPLITUDE AND PHASES

S.A. Deykalo, S.V. Zhenzhera

In work on the basis of account of statistical dependence of peak and phase fluctuations accordingly from релєвським and normal distributing laws the results of design of device of correction of phase fluctuations of harmonious signal mutual correlation of fluctuations of amplitude and phase is taken into account in which are resulted. It is shown that over the account of mutual correlation brings to the increase of exactness of correction of phase and diminishing of time, necessity, for proceeding in descriptions of initial signal.

Keywords: correlation, fluctuations, correction of phase, distributions, in troposphere.