

Синтез фильтра-компенсатора дисперсионных искажений широкополосных сигналов на основе метода частотной выборки

К.Х. Галлямов, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), аспирант; kamil.gallyamov.2000@mail.ru
Е.М. Лобов, МТУСИ, профессор, доцент, д.т.н.; e.m.lobov@mtuci.ru

УДК 621.396.24

DOI: 10.34832/ELSV.2026.79.5.009

Аннотация. Исследуется компенсация дисперсионных искажений широкополосных сигналов в ионосферном канале радиосвязи. Из-за различных фазовых задержек спектральные компоненты сигнала приходят к приёмнику с различной групповой задержкой, что приводит к нелинейной зависимости задержки от частоты. Для описания фазочастотной характеристики (ФЧХ) используется полиномиальная модель. Предлагается метод частотной выборки для синтеза компенсирующего фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра) с квадратичной аппроксимацией ФЧХ. Исследуется эффект Гиббса и определяется минимальное число коэффициентов КИХ-фильтра-компенсатора при различных параметрах канала, ширины спектра и частоты дискретизации.

Ключевые слова: радиосвязь, ионосфера, компенсатор, метод частотной выборки, эффект Гиббса, широкополосный сигнал, дисперсионные искажения.

Для цитирования: Галлямов, К.Х. Синтез фильтра-компенсатора дисперсионных искажений широкополосных сигналов на основе метода частотной выборки / К.Х. Галлямов, Е.М. Лобов // Электросвязь. – 2026. – №5. – С. 77-88.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосферная радиосвязь осуществляется в коротковолновом диапазоне путем отражения радиоволн от ионосферы для связи на больших расстояниях (сотни и тысячи километров), что особенно важно в удалённых и полярных районах. Кроме того, её использование экономически выгодно, так как требует минимальных затрат на инфраструктуру и оборудование [1]. Наиболее востребованной ионосферная радиосвязь является в военной сфере, службах спасения и научных исследованиях. В последние годы изучаются перспективы применения данного типа связи для гиперзвуковых летательных аппаратов, а также обмена видеоданными [2, 3]. Для повышения скорости передачи информации требуется увеличение ширины спектра сигнала. Однако при использовании широкополосных сигналов явно проявляются дисперсионные эффекты, в результате которых наблюдается нелинейная зависимость группового времени запаздывания узкополосных компонент широкополосного сигнала от частоты, приводящей к искажениям и сопутствующему уменьшению отношения сигнал-шум при корреляционной обработке [4]. В литературе описаны различные корректирующие фильтры и устройства, предназначенные для устранения искажений, вызванных дисперсионными свойствами ионосферы Земли, как среды распространения электромагнитных волн. В работах [5, 6] представлен алгоритм компенсации дисперсионных искажений, который использует банк цифровых фильтров, устанавливающий связь

между отклонением реальной ФЧХ относительно желаемой и сложностью компенсатора. В то же время отсутствует информация о том, как определить приемлемые параметры для фильтра-компенсатора, когда он выступает в роли независимого устройства, учитывающего отклонения как по ФЧХ, так и по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ). В данной статье рассматривается усовершенствованный метод частотной выборки: вместо традиционного использования линейной функции описания ФЧХ, присущей КИХ-фильтрам, применяется такая ФЧХ, которая будет стремиться к квадратичной зависимости [7] для разных значений крутизны дисперсионной характеристики (ДХ).

ЧАСТОТНАЯ ВЫБОРКА С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ В ИОНОСФЕРНОМ КАНАЛЕ

Одним из традиционных методов проектирования КИХ-фильтров является метод частотной выборки [8, 9]. Наиболее часто прибегают к данному методу в случаях, когда необходимо быстрое проектирование и допускаются небольшие внеполосные искажения. В общем виде его можно представить следующим образом:

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_d(e^{j\hat{\omega}}) e^{j\hat{\omega}n} d\hat{\omega},$$

где $h_d(n)$ – импульсная характеристика (ИХ) сигнала во временной области; n – текущий номер отсчёта времени, $n \in \mathbb{Z}$; $H_d(e^{j\hat{\omega}})$ – частотная характе-