

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ АППРОКСИМАЦИИ ФУНКЦИИ ГРУППОВОГО ВРЕМЕНИ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

М.М Касперович, В.А Кондратёнок

В работе проводится анализ возможности аппроксимации функции группового времени запаздывания от частоты, при различной интегральной электронной концентрации, с целью сокращения времени на вычисления учета ионосферных искажений. Применение в данной функции информации о текущем состоянии ионосферы, которая содержится в IONEX и RINEX файлах.

Все радиосигналы, проходящие через ионосферу Земли, подвергаются искажениям в силу ее диспергирующих свойств. Влияние на электромагнитную волну (ЭМВ) уменьшается по мере увеличения несущей частоты. В СВЧ диапазоне, как свидетельствует [1], можно применять некоторые упрощения в расчетах взаимодействия плазмы ионосферы и ЭМВ. Однако это может привести к значительным погрешностям при обработке сигнала, что продемонстрировано в [2] на примере сверхширокополосного (СШП) линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала с девиацией частоты $\Delta f_m = 1$ ГГц на средней частоте $f_0 = 10$ ГГц и длительностью импульса $T_0 = 1$ мкс. Сигналы с подобными параметрами могут применяться при зондировании околоземного пространства для достижения высокой разрешающей способности. Использование неупрощенной математической модели позволяет получить более точные результаты, но ее применение приводит к увеличению вычислительных затрат.

Авторами выдвинута гипотеза о возможности аппроксимации функции группового времени запаздывания (ГВЗ) $t_{гр}$ от частоты f при различной интегральной электронной концентрации $(n_e)_{инт}$ (часто встречается понятие ТЕС – Total Electron Content). Указанная аппроксимация предлагается к использованию с целью сокращения вычислительных затрат при условии сохранения точности расчетов.

Результаты анализа возможности указанной аппроксимации представлены в настоящей статье. В качестве примера рассмотрена дневная ионосфера в летний период при умеренной солнечной активности, параметры которой приведены в [3].

Ввиду того, что величина ТЕС сильно зависит не только от текущего состояния ионосферы, но и от угла места θ (от длины радиотрассы, которая проходит через верхние слои атмосферы), в математической модели влияния ионосферы Земли на сверхширокополосные сигналы X-диапазона, рассмотренной в [2], дополнительно были учтены сферичность Земли и ионосферы, а также проявление рефракции в ионосфере и тропосфере.

В результате было выявлено, что с уменьшением угла места θ сигнал искажается значительно больше, чем без учета сферичности и рефракции, как

показано на рисунке 1, где для наглядности ось времени пересчитана и представлена в метрах ($r_{ц}$ – расстояние до лоцируемого объекта).

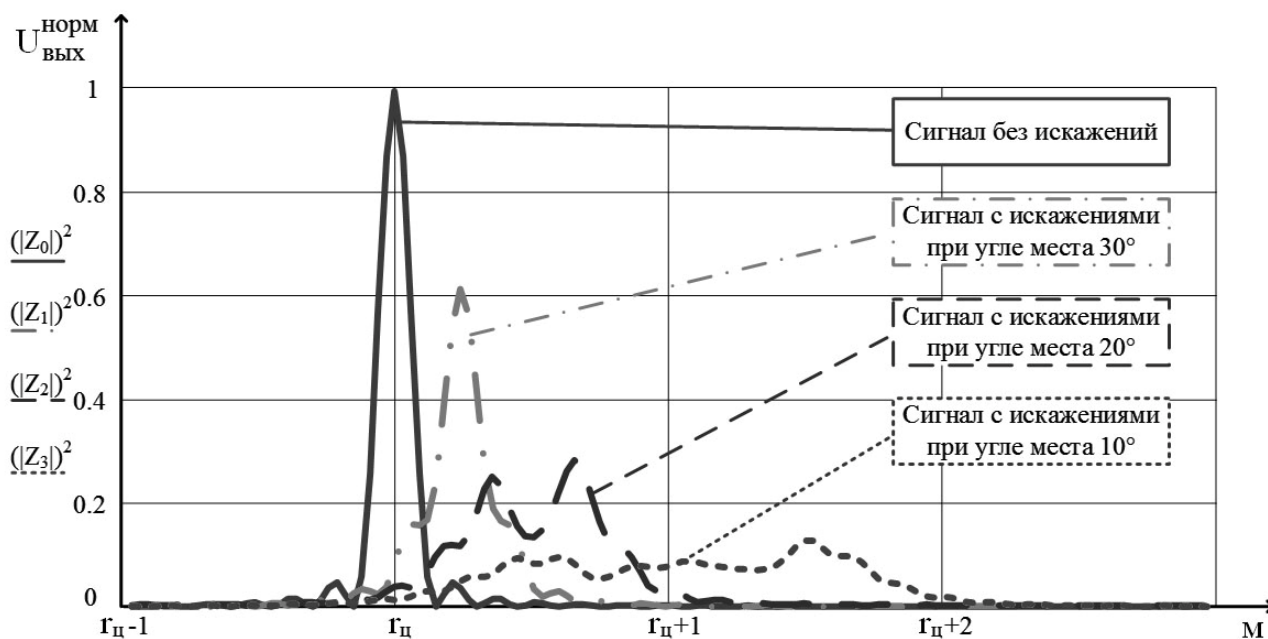


Рис.1. Искажения ЛЧМ сигнала в зависимости от угла места.

Смещение принимаемого отраженного сигнала, уменьшение его амплитуды и «рассыпание» объясняется тем, что коэффициент преломления в ионосфере зависит от частоты сигнала, а гармоники на разных частотах имеют и различную скорость распространения, и отличный друг от друга путь.

На рисунке 2 представлена зависимость группового времени запаздывания $t_{гр}$ от частоты f , рассчитанная в соответствии с [4], и два способа ее аппроксимации.

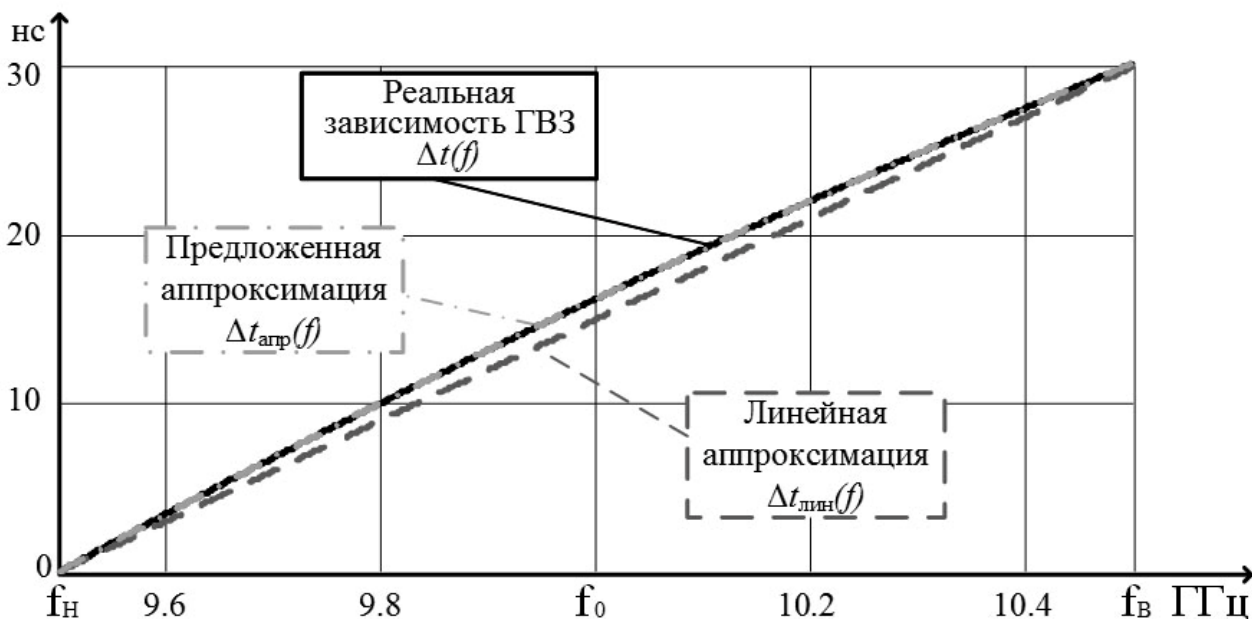


Рис.2. Изменение времени группового запаздывания.

Величина изменения группового времени запаздывания $\Delta t_{гр}$ рассчитывалась в соответствии со следующим выражением:

$$\Delta t(f) = t_{гр}(f_H) - t_{гр}(f)$$

где $t_{гр}(f_H)$ – групповое время запаздывания на частоте $f_H = 9.5$ ГГц;
 $t_{гр}(f)$ – групповое время запаздывания на текущей частоте.

Применение линейной аппроксимации зависимости (1) на рисунке 2 (как простейшей) приводит к сильному искажению боковых лепестков ЛЧМ сигнала, что показано на рисунке 3.

$$\Delta t_{лин}(f) = f * \tan(\Delta t_{max} / \Delta f), \quad (1)$$

где $\Delta t_{max} = t_{гр}(f_H) - t_{гр}(f_B)$ – максимальный разброс ГВЗ;
 Δf – девиация частоты.



Рис.3. Компенсация искажений ЛЧМ сигнала с помощью функций аппроксимаций ГВЗ.

Для устранения данной проблемы предлагается применять параболическую (2) и кубическую (3) поправки линейной аппроксимации (рисунок 4а и 4б соответственно):

$$\Delta t_{пар}(f) = -\frac{(f - f_{cp})^2}{f_{cp}^2} * \Delta_{лин}, \quad (2)$$

где f_{cp} – средняя частота;

$\Delta_{лин}$ – максимальная ошибка между ЧКГЗ и ее линейной аппроксимации,

$$\Delta t_{куб}(f) = ((f - f_{cp})^3 - f_{cp}^2 * (f - f_{cp})) * \Delta_{пар}, \quad (3)$$

где $\Delta_{пар}$ – максимальная ошибка параболической аппроксимации.

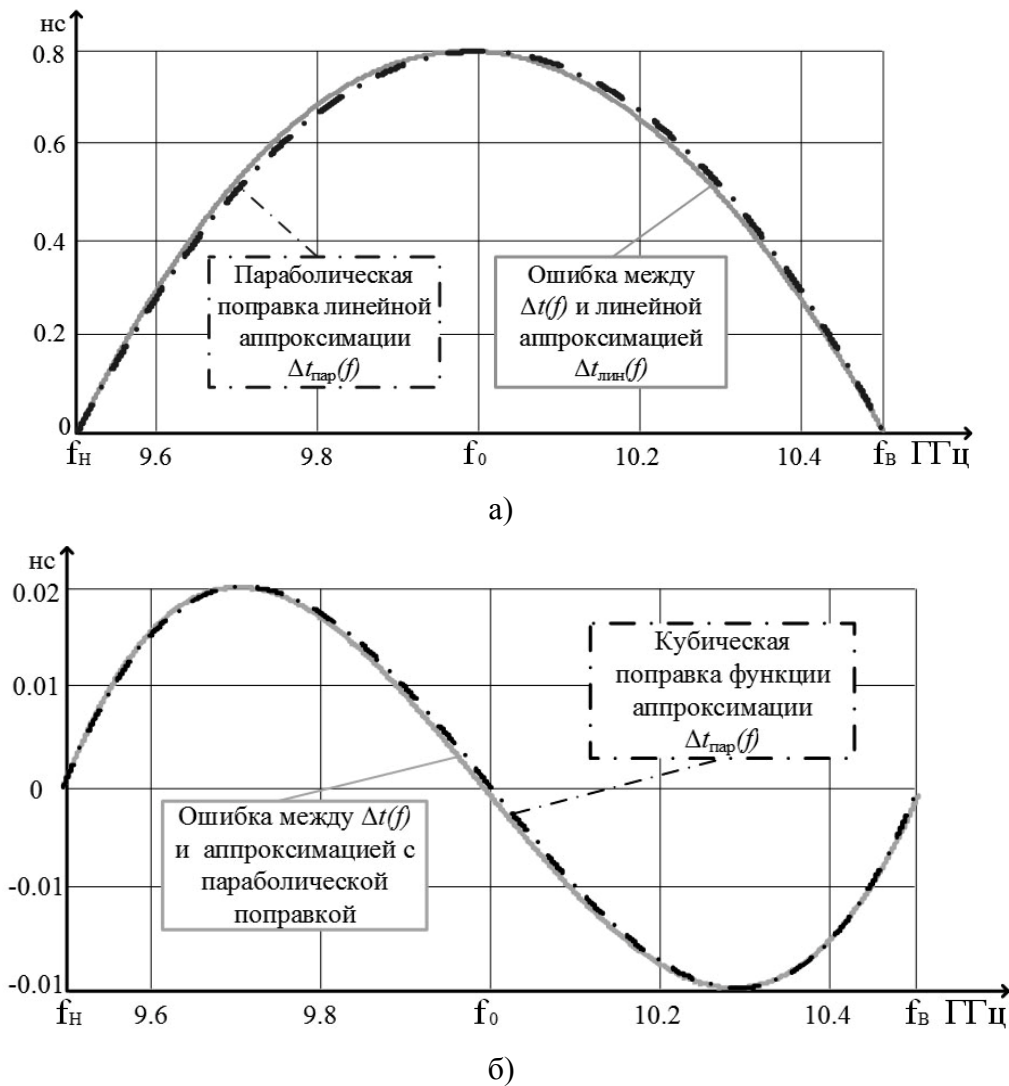


Рис.4. Поправки к линейной аппроксимации.

Таким образом, с помощью суммарной функции аппроксимации (4), можно компенсировать искажения, вносимые ионосферой (рисунок 3). Сложность заключается в определении для функций аппроксимации переменных Δt_{\max} , $\Delta t_{\text{лин}}$ и $\Delta t_{\text{пар}}$. В ходе исследований было установлено, что $\Delta t_{\text{лин}}$ и $\Delta t_{\text{пар}}$ линейно зависят от разброса ГВЗ Δt_{\max} который, в свою очередь, зависит от интегральной концентрации электронов ТЕС.

$$\Delta t_{\text{апр}}(f) = \Delta t_{\text{лин}}(f) + \Delta t_{\text{пар}}(f) + \Delta t_{\text{куб}}(f), \quad (4)$$

Так как ионосфера Земли достаточно быстро изменяется, как показано в [4], то для оптимальной компенсации искажений нужно иметь информацию о ее текущем состоянии. Данные сведения можно получить в открытом доступе в IONEX файлах, которые содержат мировые карты абсолютного вертикального ТЕС и соответствующие им карты погрешностей вычисления ТЕС с периодичностью два часа. Пример такой карты представлен на рисунке 5.

При необходимости получения более оперативной информации можно применять RINEX файла, которые также находятся в открытом доступе и обновляются каждые 15 секунд. IONEX и RINEX файлы [5] формируются по данным двухчастотных GPS приемников, расположенных по всей Земле.

05/30/11
15:30 UT

Ionospheric TEC Map

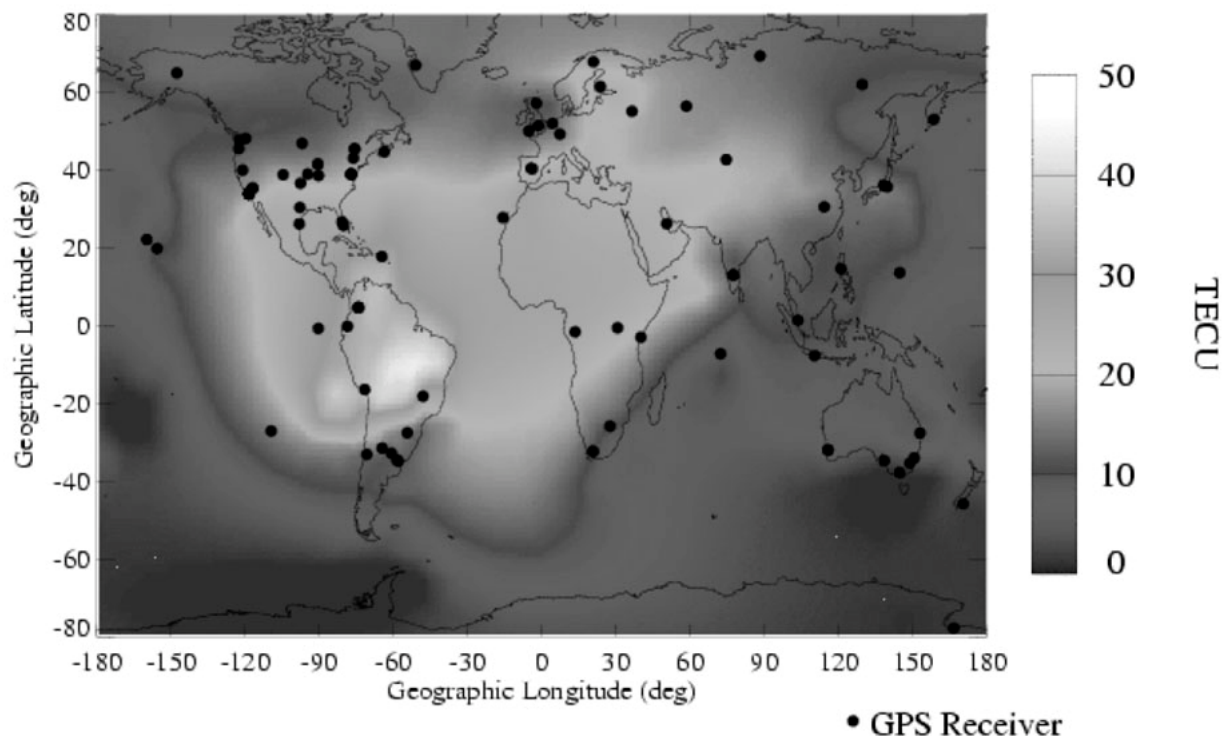


Рис.5. Глобальная карта распределения ТЕС.

Анализ полученных данных подтвердил возможность применения аппроксимации функции группового времени запаздывания в ионосфере Земли с целью получения высокой разрешающей способности при зондировании околоземного пространства сверхширокополосными сигналами в случае необходимости уменьшения вычислительных затрат при условии сохранения точности расчетов.

Дальнейшие исследования будут направлены на практическое применение разработанных моделей для обработки сигналов GPS с учетом информации о реальном состоянии ионосферы.

Список литературы

1. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Справочник. Под ред. Я.Д.Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
2. Касперович М.М., Кондратёнок В.А. Результаты краткого сравнительного анализа математических моделей влияния ионосферы Земли на сверхширокополосные сигналы X-диапазона. – «Системный анализ и прикладная информатика», №1, 2015.
3. Nathan Blaunstein, Eugeniu Plohotniuc. Ionosphere and applied aspects of radio communication and radar. – CRC Press, 2008. – 577 p.
4. Брюнелли Б.Е., Намгладзе А.А. Физика ионосферы Земли. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
5. Электронный ресурс <http://sopac.ucsd.edu/>

Касперович Максим Михайлович, адъюнкт кафедры радиолокации и приемо-передающих устройств учреждения образования “ Военная академия Республики Беларусь”, kasperovich1989@mail.ru

Кондратёнок Василий Анатольевич, начальник кафедры радиолокации и приемо-передающих устройств учреждения образования “ Военная академия Республики Беларусь”, кандидат технических наук, доцент.