

## КОРРЕКЦИЯ ИСКАЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ ИОНОСФЕРУ

М.М. Касперович, В.А. Кондратёнок, С.А. Горшков, А.С. Солонар, Е.Н. Буйлов

*Военная академия Республики Беларусь, Минск, e-mail: kasperovich1989@mail.ru*

На радиолокационный сигнал в большей или меньшей степени воздействуют различные искажающие факторы: запаздывание по апертуре антенны на передачу и прием, искажения за счет ионосферы, движение цели с высокой скоростью, вращение цели или ее элементов, неидентичность частотных характеристик приемо-передающих трактов активных антенных решеток и другие. Для оптимальной обработки сигнала необходимо детально изучать все искажения и находить способы их компенсации. Некоторые искажающие факторы были рассмотрены в [1]. В данной работе рассматриваются искажения за счет ионосферы.

Ионосфера – анизотропная диспергирующая неоднородная среда. Следовательно, электромагнитные волны (ЭМВ) в ней подвергаются нелинейным искажениям, которые изменяют временную структуру сигнала. Данный вопрос рассмотрен 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.

Для оценки возможности и эффективности коррекции искажений, которые рассматривались в [2], в работе представлены результаты исследований влияния разности (отношения) истинного значения интегральной электронной концентрации  $(n_e)_{\text{инт}}$  и оцененного  $(\hat{n}_e)_{\text{инт}}$ . Кроме того, предложен способ обработки СШП ЛЧМ сигналов для компенсации искажений.

### *Исследования искажений принятого ЛЧМ радиоимпульса при компенсации с использованием оценки интегральной электронной концентрации $(\hat{n}_e)_{\text{инт}}$ и влияния отношения $(\hat{n}_e)_{\text{инт}}/(n_e)_{\text{инт}}$*

В [2] полагалось, что закон модуляции ЛЧМ радиоимпульса одиночной амплитуды описывается в соответствии со следующим выражением:

$$U_{\text{искаж}}(t - t_{\text{гр}}) = \begin{cases} \exp\left\{j\pi \frac{\Delta f_m}{T_0} (t_i - t_{\text{гри}})^2\right\}, & \text{если } |t - t_{\text{гр}}| \leq \frac{T_0}{2}, \\ 0, & \text{если } |t - t_{\text{гр}}| > \frac{T_0}{2} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{гри}} = 2\left(\frac{r}{c} + 40,3 \cdot \frac{(n_e)_{\text{инт}}}{c \cdot f_i^2}\right)$  – время групповой задержки [3] для каждой «оцениваемой» частоты  $f_i$ ;

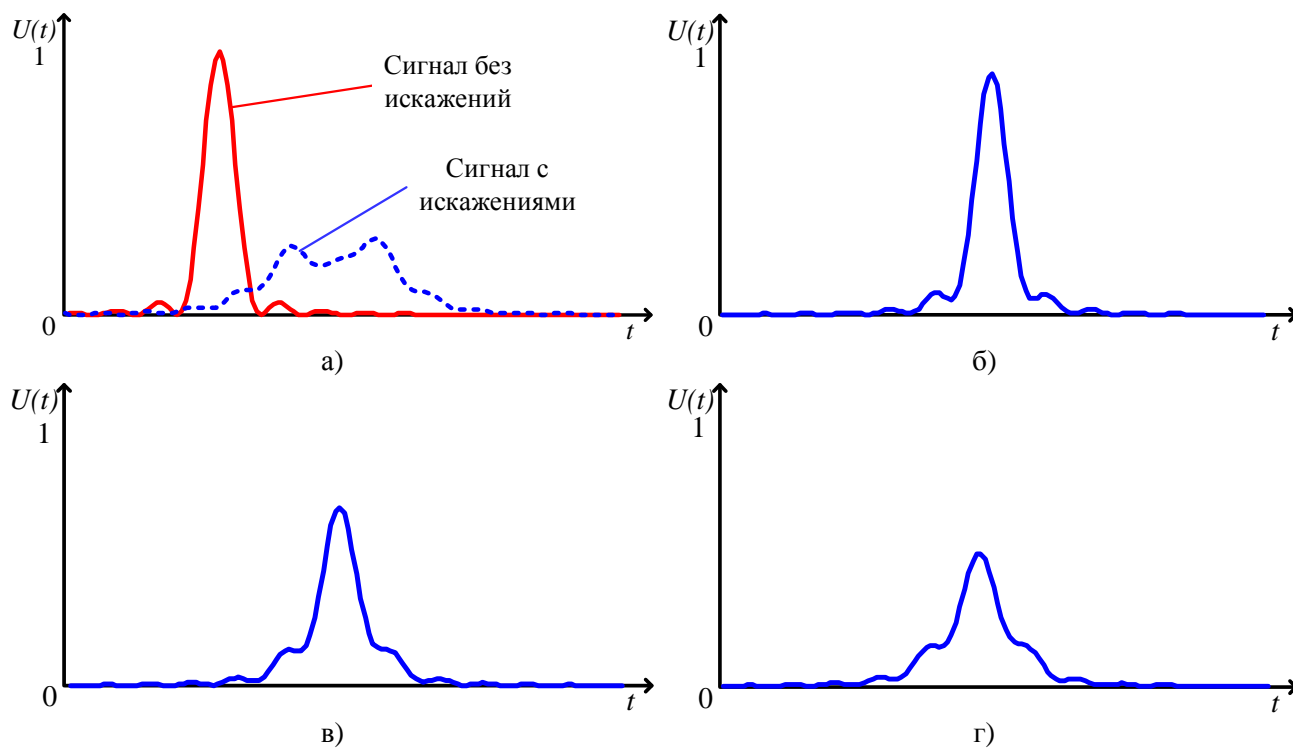
$t_i$  – время прихода ЭМВ на частоте  $f_i$  без задержки;

$r$  – дальность до цели.

Для «оцененного» закона модуляции ЛЧМ радиоимпульса полагается, что в выражении (1) выполняется  $(n_e)_{\text{инт}} = (\hat{n}_e)_{\text{инт}}$ .

Под интегральной электронной концентрацией  $(n_e)_{\text{инт}}$  понимается число электронов на пути радиотрассы в столбе площадью  $1 \text{ м}^2$ . При взаимодействии ЭМВ с заряженными

частицами возникают искажения, что проиллюстрировано на рисунке 1.а, где учитывалось, что  $(n_e)_{\text{инт}} = 10^{19}$  (наихудший случай для ЭМВ в ионосфере, которая описана в [3]). Если точно учесть  $(n_e)_{\text{инт}}$ , то сигнал будет полностью восстановлен (без искажений, рисунок 1.а) При увеличении ошибки определения  $(n_e)_{\text{инт}}$  возрастают искажения (рисунок 1.б – 1.г)



**Рисунок 1 – Результат сжатия ЛЧМ радиоимпульса:**

- а) без компенсации искажений;    б) при  $(\hat{n}_e)_{\text{инт}}/(n_e)_{\text{инт}} = 1,3$ ;  
 в) при  $(\hat{n}_e)_{\text{инт}}/(n_e)_{\text{инт}} = 1,5$ ;    г) при  $(\hat{n}_e)_{\text{инт}}/(n_e)_{\text{инт}} = 1,6$ .

Анализируя рисунок 1, можно увидеть, что незначительная ошибка (искажение принятого сигнала) наблюдается при  $(\hat{n}_e)_{\text{инт}}/(n_e)_{\text{инт}} \leq 1,3$ , где четко различаются главный и боковые лепестки. Следовательно, при компенсации искажений необходимо оценить интегральную электронную концентрацию с точностью не хуже 30%.

### ***Обработка СШП ЛЧМ сигналов с компенсацией искажений***

С целью адаптивной коррекции атмосферных искажений СШП ЛЧМ сигналов на этапе формирования или обработки предлагается использовать многоканальный дискриминатор, построенный по схеме, показанной на рисунке 2, что позволит осуществить сжатие отраженных сигналов после коррекции без значительных искажений.

Здесь на вход смесителей подается ЛЧМ сигнал  $U_c((n_e)_{\text{инт}}^{(\text{ист})})$ , параметры которого определяются истинной величиной интегральной электронной концентрации  $(n_e)_{\text{инт}}^{(\text{ист})}$  согласно выражению (1). На второй вход смесителей поступают с опорных генераторов ( $\text{ОГ}_i$ ) сигналы  $U_{\text{ос}}((n_e)_{\text{инт}}^{(i)})$ , параметры которых являются функцией от значения  $(n_e)_{\text{инт}}^{(i)}$ . Величина  $(n_e)_{\text{инт}}^{(i)}$ , в свою очередь, выбирается в постоянном запоминающем устройстве (ПЗУ) в зависимости от номера рассматриваемого канала дискриминатора.

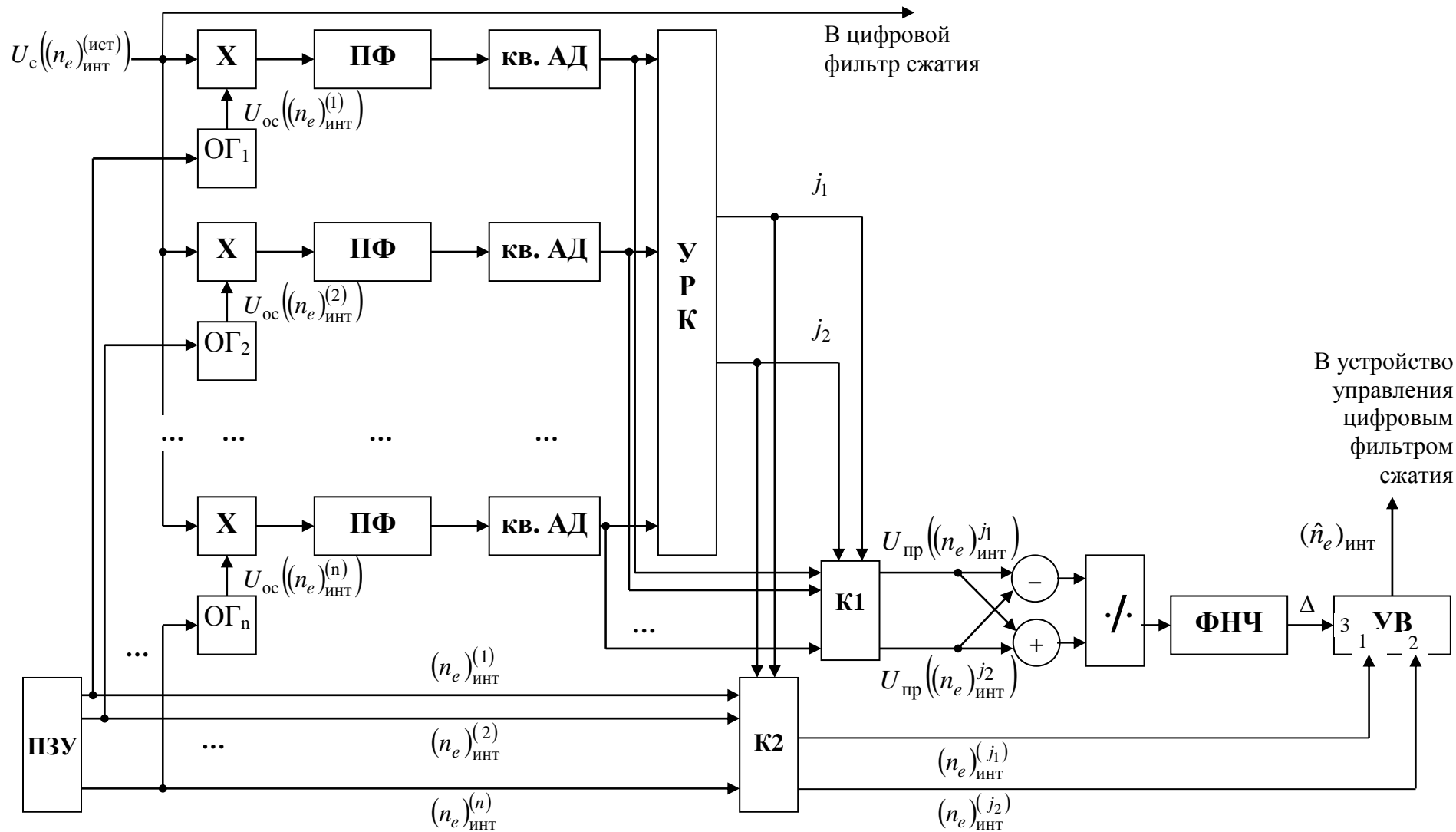
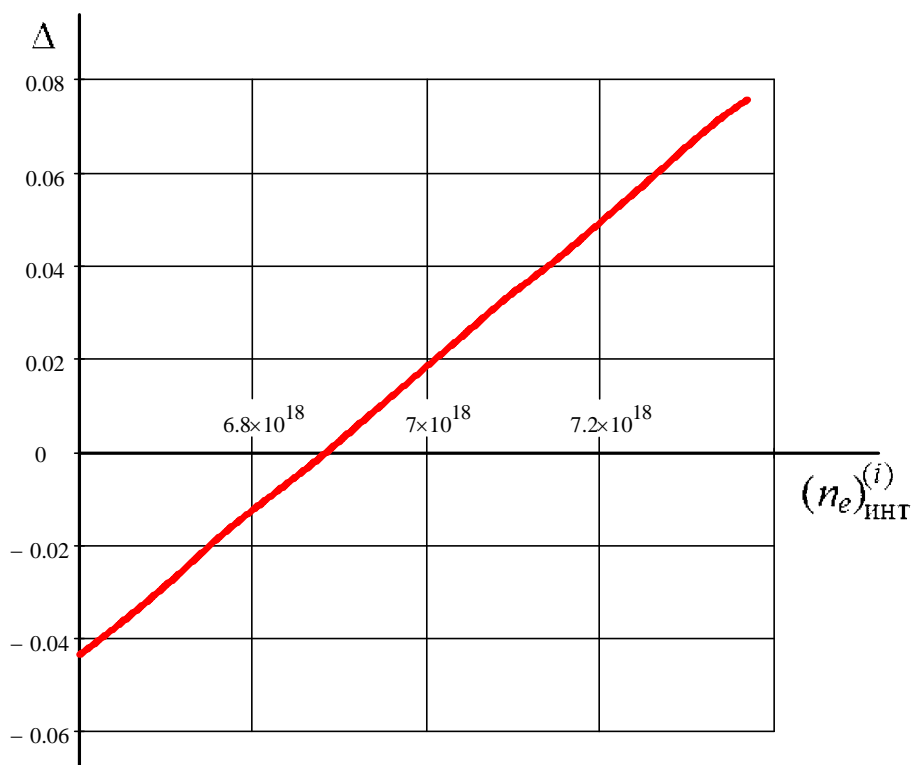


Рисунок 2 – Дискриминатор искажений отраженного сигнала

Набор значений  $(n_e)_{\text{инт}}^{(i)}$  определен исходя из условия обеспечения полного перекрытия всего диапазона полной концентрации электронов в ионосфере с приемлемой нелинейностью дискриминационной характеристики при условии анализа двух соседних каналов.

К примеру, в ходе исследований рассматривался диапазон значений  $(n_e)_{\text{инт}} \in (10^{18}; 10^{19}) \text{ м}^{-2}$  согласно [3]. Разделение каналов осуществлялось следующим образом:  $(n_e)_{\text{инт}}^{(1)} = 10^{18}$ ,  $(n_e)_{\text{инт}}^{(2)} = 1,7 \cdot 10^{18}$ ,  $(n_e)_{\text{инт}}^{(3)} = 2,4 \cdot 10^{18}$ , ... ,  $(n_e)_{\text{инт}}^{(14)} = 10,1 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$ . Дискриминационная характеристика при этом соседних каналов действительно была близка к линейной, что проиллюстрировано на рисунке 3.



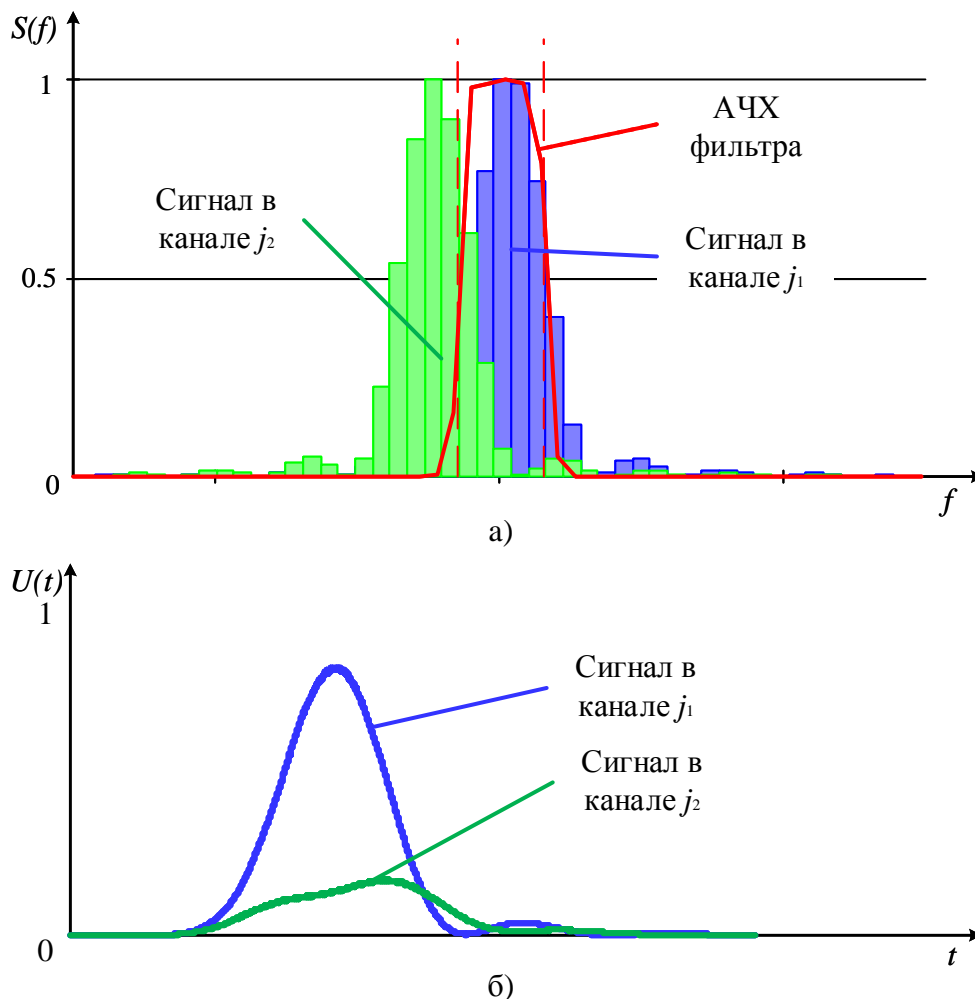
**Рисунок 3 – Дискриминационная характеристика**

После переноса на промежуточную частоту  $f_{\text{пр}}$  сигнал в каждом канале подается на полосовой фильтр (ПФ) (в настоящей схеме реализован полосовой фильтр Баттерворта), настроенный на  $f_{\text{пр}}$ , выход которого соединен с квадратичным амплитудным детектором (кв. АД). Напряжения каждого канала с выхода квадратичного амплитудного детектора подаются в устройство ранжирования каналов (УРК).

В связи с тем, что влияние ионосферы на ЛЧМ сигнал выражается в появлении зависимости времени прихода каждой из его частотных составляющих от номинала частоты этой составляющей (времени группового запаздывания), спектр сигнала изменяется [2,3] и его вид и характеристики зависят от величины  $(n_e)_{\text{инт}}^{(i)}$  данного канала обработки (влияние ошибки оценки  $(n_e)_{\text{инт}}$  на вид сжатого принятого ЛЧМ сигнала было обнаружено и описано выше). Следовательно, амплитуды сигналов на выходах квадратичных амплитудных детекторов различаются от канала к каналу и зависят от степени «близости»  $(n_e)_{\text{инт}}^{(i)}$  к  $(n_e)_{\text{инт}}^{(\text{ист})}$ . Прохождение сигналов в соседних каналах через полосовой фильтр проиллюстрировано на рисунке 4.а.

Устройство ранжирования каналов определяет номера двух соседних каналов, в которых сигнал с квадратичных амплитудных детекторов (рисунок 4.б) максимален ( $j_1$  и  $j_2$ ), а затем

при помощи коммутатора (К1) производит дальнейшую суммарно-разностную обработку именно для этих двух каналов, получая после сглаживания в фильтре нижних частот (ФНЧ) (в схеме используется фильтр Баттерворта нижних частот), установленного на выходе делителя, величину ошибки  $\Delta$ .



**Рисунок 4 – Сигналы в соседних каналах:**

а) при прохождении через ПФ; б) после квадратичных амплитудных детекторов.

Наряду с этим номера выбранных каналов ( $j_1$  и  $j_2$ ) подаются в качестве управляющих сигналов на второй коммутатор (К2). Также на К2 с ПЗУ поступают значения  $(n_e)_{\text{инт}}^{(i)}$ , с учетом которых формировались опорные сигналы  $U_{\text{ос}}((n_e)_{\text{инт}}^{(i)})$ . В коммутаторе К2 под воздействием управляющих сигналов производится выбор значений  $(n_e)_{\text{инт}}^{(j_1)}$  и  $(n_e)_{\text{инт}}^{(j_2)}$ , которые затем поступают в вычислительное устройство (входы 1 и 2). На вход 3 вычислительного устройства подается сигнал ошибки  $\Delta$  и производится вычисление оценочного значения интегральной электронной концентрации  $(\hat{n}_e)_{\text{инт}}$  согласно выражению (2).

$$(\hat{n}_e)_{\text{инт}} = \frac{(n_e)_{\text{инт}}^{(j_1)} + (n_e)_{\text{инт}}^{(j_2)}}{2} + \Delta \cdot [(n_e)_{\text{инт}}^{(j_1)} - (n_e)_{\text{инт}}^{(j_2)}]. \quad (2)$$

Значение  $(\hat{n}_e)_{\text{инт}}$  подается затем в устройство управления цифровым фильтром сжатия для дальнейшей обработки принятого СШП сигнала  $U_c((n_e)_{\text{инт}}^{(\text{ист})})$  с адаптивной коррекцией

атмосферных искажений, обеспечивая минимизацию искажений принятого сигнала.

Представленный дискриминатор искажений отраженного сигнала позволяет определить величину  $(\hat{n}_e)_{\text{инт}}$  относительно  $(n_e)_{\text{инт}}^{(\text{ист})}$  с точностью около 2...4 процентов. Если учесть, что интегральную электронную концентрацию достаточно оценить с точностью не хуже 30%, то при использовании данного устройства существенных различий между сжатым после коррекции сигналом и результатом его «оптимального» приема практически нет, что позволит в дальнейшем произвести обработку сигнала с высоким качеством.

## Литература

1. Буйлов Е.Н., Горшков С.А, Кондратёнок В.А., Касперович М.М. Компенсация угловых и доплеровских искажений дискретных частотно-манипулированных сигналов с линейными частотно-модулированными дискретами в антенных решетках. – «Доклады БГУИР» №5 (91) 2015. с. 67 – 73.
2. Касперович М.М., Кондратёнок В.А. Результаты краткого сравнительного анализа математических моделей влияния ионосферы Земли на сверхширокополосные сигналы Х-диапазона. – «Системный анализ и прикладная информатика» №1 2015.
3. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Справочник. Под ред. Я.Д.Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007, 512 с.