

## ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ НА СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ СИГНАЛЫ

М.М. Касперович, В.А. Кондратёнок

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

### Введение

Для получения достоверной радиолокационной информации, в том числе для объектов, находящихся за пределами атмосферы или в ее верхних слоях, необходимо проводить эффективную обработку сигналов, что невозможно без учета влияния искажений сверхширокополосных радиолокационных сигналов при прохождении радиотрассы. В данном докладе рассмотрен один из факторов искажения – наличие в ионосфере большой концентрации электронов  $n_e$ , которые отрицательно влияют на временную структуру сигнала.

### Строение ионосферы

Ионосфера представляет собой плазму, квазинейтральную в пределах некоторого объёма, т.е. число положительных зарядов в ней равно числу отрицательных. Свободные заряды появляются в ионосфере в процессе ионизации, при котором один или несколько электронов с наружных оболочек атомов и молекул отрываются ввиду воздействия внешних источников энергии. Основным источником ионизации газов атмосферы является солнечная радиация. Солнце излучает электромагнитные колебания широкого спектра и выбрасывает движущиеся с большой скоростью потоки заряженных частиц (корпускул – электронов, протонов). Эти потоки называют солнечным ветром. Ударная ионизация возникает при столкновении корпускул с атомами и молекулами. Роль ударной ионизации проявляется главным образом в полярных районах, куда за счет магнитного поля Земли стекается солнечный ветер. Источником фотоионизации является и радиация звезд. Но роль этого источника мала. Также мала роль еще одного источника ударной ионизации – метеоров, вторгающихся в земную атмосферу со скоростями 11-73 км/с и создающих местную ионизацию в столбах газа (столбы существуют от одной до нескольких секунд на высотах от 80 до 120 км).

Процесс рекомбинации обратен процессу ионизации. При тепловом движении частицы с зарядами противоположных знаков оказываются на малых расстояниях друг от друга. Под действие кулоновской силы они соединяются, превращаясь в молекулы и атомы.

Сведения о строении ионосферы получены экспериментальным путем. На высотах от 250 до 400 км имеется основной максимум ионизации, называемый слоем  $F_2$ . Области ионосферы, находящиеся выше и ниже основного максимума ионизации, называют внешней и внутренней ионосферой. Части ионосферы, содержащие относительные максимумы  $N$ , называют слоями. Во внутренней ионосфере имеются четыре регулярных слоя  $D$ ,  $E$ ,  $F_1$  и  $F_2$ . Каждый слой характеризуется электронной плотностью  $n_e$ , высотой  $h_0$  нижней границы слоя, эффективного числа  $\nu_{эф}$  соударений в секунду с тяжелыми частицами.

Параметры ионосферных слоев определяются регулярными суточными и сезонными изменениями излучения Солнца. С наступлением темноты из-за рекомбинации исчезает слой  $D$ , но слой  $E$  сохраняется, ночью его значение  $n_e$  уменьшается. Слой  $F_1$  в средних широтах наблюдается только в летние дни. В остальное время он сливается со слоем  $F_2$ , образуя

область  $F$ . Характеристики основных слоев ионосферы для средних широт представлены в таблице 1.

**Таблица 1 – Характеристики основных слоев ионосферы для средних широт**

Слой	Высота максимума, км	День		Ночь
		$n_{e \min}, \text{M}^{-3}$	$n_{e \max}, \text{M}^{-3}$	$n_e, \text{M}^{-3}$
D	70	$10^8$	$2 \cdot 10^8$	$10^7$
E	110	$1,5 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^9$
F <sub>1</sub>	180	$3 \cdot 10^{11}$	$5 \cdot 10^{11}$	–
F <sub>2</sub> (зима)	220-280	$6 \cdot 10^{11}$	$25 \cdot 10^{11}$	$10^{11}$
F <sub>2</sub> (лето)	250-320	$2 \cdot 10^{11}$	$8 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$

Регулярные изменения  $n_e$ ,  $h_0$ ,  $v_{\text{эф}}$  связаны и с 11-летним циклом изменения солнечной активности, характеризуемым относительным числом солнечных пятен. Зависимость  $n_e$ ,  $h_m$ ,  $h_0$ ,  $v_{\text{эф}}$  от числа последних позволяет прогнозировать параметры ионосферы на некоторый период вперед.

Регулярная структура ионосферы может нарушаться. Различают два вида отклонений  $n_e$  от регулярного среднего значения: флуктуации около средних значений, существующие всегда, и длительные аномальные изменения средних значений, появляющиеся в периоды ионосферных возмущений.

Флуктуации  $n_e$  создают неоднородную, быстроменяющуюся локальную структуру ионосферы. Неоднородности разделяют на мелкомасштабные (с горизонтальными размерами 100-1000 м) и крупномасштабные (с горизонтальными размерами в десятки и сотни километров). Мелкомасштабные неоднородности неустойчивы, они образуются за счет вихревых движений и диффузии и быстро сменяют друг друга. Среднеквадратические скорости хаотического движения неоднородностей в слое  $D$  равны приблизительно 1 м/с, в слое  $E$  – 2–4 м/с, в области  $F$  – 6–7 м/с. Скорости регулярного дрейфа в слоях  $D$  и  $E$  около 60–80 м/с, в области  $F$  – от 20 до 500 м/с.

Аномальные существенные отклонения  $n_e$  от средних значений и нарушения самой структуры ионосферы, длящиеся более 1 ч, называют ионосферными возмущениями и бурями. Больше воздействуют на работу радиолиний возмущения корпускулярной природы. При этом Земля попадает в корпускулярные потоки, испускаемые активным Солнцем. Заряженные частицы, двигаясь вокруг силовых линий магнитного поля Земли по траекториям, подобным спирали, направляются к полярным областям. Они вызывают не только ионосферные, но и магнитные бури. Возмущения зависят от широты. В полярных широтах возмущается вся ионосфера, возрастают  $n_e$  и  $v_{\text{эф}}$  слоя  $D$ . В слое  $F_2$  уменьшается  $n_e$  в освещенной части Земли и повышается в затененной – за счет появления спорадических образований. У полюса в любое время суток появляется спорадический слой  $E_s$ . В средних широтах в основном возмущается область  $F$ , только при сильных ионосферных бурях возмущаются и нижние слои ионосферы.

При вспышках рентгеновского излучения на Солнце в ионосфере появляются возмущения волнового происхождения, длящиеся от нескольких минут до 1–2 ч в освещенной части земного шара. При этом быстро возрастает  $n_e$  слоя  $D$ .

Принимая во внимание все вышеизложенное, можно сделать вывод, что концентрация электронов в ионосфере, а, следовательно, и частота их соударений постоянно изменяется относительно своих средних значений, приведенных в таблице 1. Это существенно затрудняет компенсацию искажений сверхширокополосных радиолокационных сигналов,

вносимых данным фактором. Применение математических моделей ионосферы совместно с ее периодическим мониторингом позволят устранить данную проблему. Часть такой модели рассмотрено далее.

### Диэлектрическая проницаемость ионосферы

Относительная диэлектрическая проницаемость ионизированного газа определяется выражением

$$\varepsilon_{\text{и}} = 1 - n_e e^2 / m \varepsilon_0 (\omega^2 + \nu_{\text{эф}}^2), \quad (1)$$

где  $n_e$  – электронная плотность;  $e$  – заряд электрона;  $m$  – его масса;  $\nu_{\text{эф}}$  – частота соударений электрона с нейтральными молекулами и ионами в единицу времени;  $\omega$  – круговая частота;  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

Для большинства диапазонов радиоволн частотой соударений можно пренебречь  $\omega^2 \gg \nu_{\text{эф}}^2$  и записать (1) в упрощенном виде:

$$\varepsilon_{\text{и}} \approx 1 - n_e e^2 / m \varepsilon_0 \omega^2. \quad (2)$$

Как видно из (2), величина  $n_e e^2 / m \varepsilon_0$  имеет размерность квадрата частоты. Обозначив ее  $\omega_u^2$ , получим:

$$\varepsilon_{\text{и}} \approx 1 - \omega_u^2 / \omega^2 = 1 - f_u^2 / f^2, \quad (3)$$

где частота  $f_u$  называется плазменной или ленгмюровской.

Если учесть, что  $m = 9,109 \cdot 10^{-31}$  кг,  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $\varepsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м, то  $f_u = \sqrt{80,8 n_e}$

Для электронных концентраций  $n_e = 10^3 \dots 10^6$  см<sup>-3</sup> ( $n_e = 10^9 \dots 10^{12}$  м<sup>-3</sup>) плазменная частота  $f_u \approx 9\sqrt{n_e}$  изменяется в пределах 0,3...9 МГц.

### Фазовая и групповая скорости в ионосфере без учета влияния магнитного поля Земли

*Описание плоской гармонической волны в однородной среде. Имеет вид*

$$\exp\left[j2\pi f\left(t - \frac{r}{c}\sqrt{\varepsilon_{\text{и}}\mu_{\text{и}}}\right)\right] = \exp\left[j2\pi f\left(t - \frac{r}{v_{\text{ф}}}\right) - \beta r\right], \quad (4)$$

где  $r$  – координата, отсчитываемая в направлении движения волны;  
 $\mu_{\text{и}}$  – относительная магнитная проницаемость среды (здесь  $\mu_{\text{и}} = 1$ );  
 $v_{\text{ф}}$  – фазовая скорость волны;  
 $\beta$  – ее коэффициент затухания (неперы на единицу длины).

Значения  $v_{\text{ф}}$  и  $\beta$  можно находить, сопоставляя левую и правую части равенства

$$\frac{1}{c^2} \varepsilon_{\text{и}} = \left(\frac{1}{v_{\text{ф}}} - \frac{\beta}{j2\pi f}\right)^2. \quad (5)$$

*Фазовая скорость волны в однородной ионосфере* – это скорость распространения фазы гармонической волны, не связанная непосредственно с передачей энергии. При малых, но заметных потерях за счет соударений из (3) и (4) следует

$$\frac{1}{v_{\phi}} = \frac{1}{c} \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon_{\text{и}}} \approx \frac{1}{c} \sqrt{1 - \frac{f_{\text{и}}^2}{f^2}} = \frac{c}{n}, \quad (6)$$

следовательно

$$v_{\phi} = \frac{c}{n}, \quad (7)$$

где  $n = \sqrt{1 - f_{\text{и}}^2 / f^2}$ .

Параметр  $n = \frac{v_{\phi}}{c}$  является показателем преломления ионосферы.

Для частот  $f \gg v_{\phi}, f_{\text{и}}$  в системе единиц СИ

$$v_{\phi} \approx \frac{c}{1 - 40,3 n_e / f^2} \approx c \cdot \left(1 + 40,3 \cdot n_e / f^2\right). \quad (8)$$

Фазовая скорость  $v_{\phi}$  волны в ионосфере, непосредственно не связанная с передачей энергии, больше скорости света  $c$  в свободном пространстве.

*Фазовое и групповое запаздывание в неоднородной ионосфере без учета рефракции.* Согласно (8) для  $f \gg f_{\text{и}}$  в системе СИ фазовое запаздывание составит

$$\psi = 2\pi f \sum_i \frac{\Delta r_i}{(v_{\phi})_i} \approx \frac{2\pi}{c} \left( fr - \frac{40,3(n_e)_{\text{инт}}}{f} \right), \quad (9)$$

где  $(n_e)_{\text{инт}} = \sum_i (n_e)_i \Delta r_i$  – число электронов на пути распространения в изогнутом столбе площадью  $1 \text{ м}^2$ .

Групповое запаздывание огибающей узкополосного колебания  $t_{\text{гр}} = (2\pi)^{-1} (d\psi/df)_0$  с несущей  $f = f_0$  находится из (9) как

$$t_{\text{гр}}(f) = (r/c) + \Delta t_{\text{гр}}(f) \approx (r/c) + 40,3 \cdot (n_e)_{\text{инт}} / cf^2. \quad (10)$$

*Групповая скорость в ионосфере.* Как и фазовая скорость, групповая скорость в ионосфере является локальной характеристикой конкретного участка пути  $\Delta r_i$  в ионосфере. Групповую скорость вводят, вычисляя набег фаз  $\Delta\psi$  и групповое запаздывание  $\Delta t_{\text{гр}i}$  для этого участка

Из приведенных соотношений следует, что  $v_{\text{гр}i} \cdot v_{\phi i} = c^2$ , т.е. увеличение фазовой скорости в  $n$  раз ведет к снижению групповой скорости в *то же число* раз.

На основании результатов анализа приведенных выше данных была разработана статистическая модель влияния концентрации электронов в ионосфере на свехширокополосные сигналы, которая представлена ниже.

### **Статистическая модель влияния концентрации электронов в ионосфере на свехширокополосные сигналы и анализ возникающих искажений**

Моделирование проводилось для следующих *исходных данных*:

- центральная частота  $f_0 = 10 \text{ ГГц}$ ;
- ширина спектра закона модуляции ЛЧМ радиоимпульса  $\Delta f_{\text{м}} = 1 \text{ ГГц}$ ;
- длительность ЛЧМ радиоимпульса  $T_0 = 1 \text{ мкс}$ ;

– электронная концентрация  $n_e$  – согласно таблице 1 (средние значения для дневных летних условий);

– дальность до цели  $r$  – согласно таблице 1 для летнего времени года;

– угол зондирования  $\theta = 90^\circ$ .

В промежуточных вычислениях рассчитывались:

– частота дискретизации  $f_d = 5\Delta f_m$ ;

– расстояние между временными отсчетами  $\Delta t = 1/f_d$ ;

– количество точек преобразования Фурье  $N_{fft} = T_0/\Delta t$  (целая часть от деления);

– массив отсчетов времени  $t_i = i \cdot \Delta t$ ;

– массив отсчетов частоты  $f_i = f_0 + \frac{\Delta f_m \cdot t_i}{T_0}$ .

Расчет параметров закона модуляции ЛЧМ радиоимпульса проводился для каждой «оцениваемой» частоты своего запаздывания  $t_{ri}$ , вносимого ионосферой с целью получения временной реализации закона модуляции ЛЧМ радиоимпульса, согласно следующего выражения

$$u_{искаж}(t-t_r) = \begin{cases} \exp\left\{j\pi \frac{\Delta f_m}{T_0} (t_i - t_{ri})^2 + 2\pi f_0 t_i\right\}, & \text{если } |t-t_r| \leq \frac{T_0}{2} \\ 0, & \text{если } |t-t_r| > \frac{T_0}{2} \end{cases}, \quad (11)$$

где  $t_{ri} = 2\left(\frac{r}{c} + 40,3 \cdot \frac{(n_e)_{\text{инт}}}{c \cdot f_i^2}\right)$  (первое слагаемое определяет запаздывание отраженного сигнала за счет прохождения до цели и обратно, а второе – за счет влияния ионосферы (различное для каждой частоты)).

Для «неискаженного» сигнала считалось, что

$$u_{неиск}(t-t_r) = \begin{cases} \exp\left\{j\pi \frac{\Delta f_m}{T_0} (t_i - t_{r1})^2 + 2\pi f_0 t_i\right\}, & \text{если } |t-t_r| \leq \frac{T_0}{2} \\ 0, & \text{если } |t-t_r| > \frac{T_0}{2} \end{cases}, \quad (12)$$

где  $t_{r1}$  – время запаздывания первого отсчета (разницу времени запаздывания для различных частот не учитывали).

На рисунке 1 представлены изображения сжатых «искаженного» (синяя пунктирная линия) и «неискаженного» (красная сплошная линия) сигналов для вертикального зондирования ( $\theta = 90^\circ$ ).

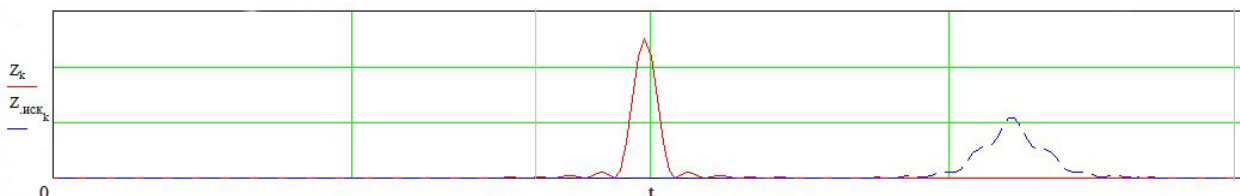


Рисунок 1 – Искаженный и неискаженный сигналы при  $\theta = 90^\circ$

Принятый искажённый сигнал вполне различим (ярко выражен максимум). Но на практике используется не только вертикальное зондирование объектов (что соответствует исходным данным). При уменьшении угла зондирования  $\theta$  путь, который пройдет электромагнитная волна через ионосферу, увеличится. Следовательно, количество электронов, с которыми она взаимодействует, также повысится. На рисунке 2

представлены изображения сжатых «искаженного» (синяя пунктирная линия) и «неискаженного» (красная сплошная линия) сигналов при  $\theta = 70^\circ$ .

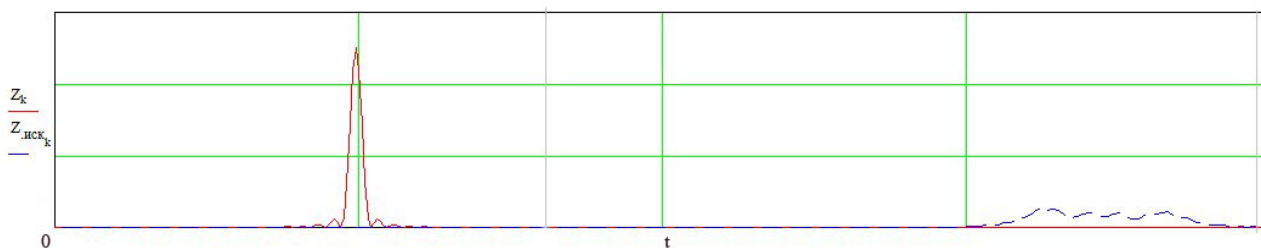


Рисунок 2 – ИСКАЖЕННЫЙ (синяя пунктирная линия) и НЕИСКАЖЕННЫЙ (красная линия) сигналы при  $\theta = 70^\circ$

Как видно, принятый искажённый сигнал уже плохо различим (не видно ярко выраженного максимума). Кроме того, при сравнении рисунка 1 и 2, заметно, что расстояние между искаженными и неискаженными сигналами различно. На практике это приведет к ошибке по дальности. Следовательно, при зондировании объектов с помощью сверхширокополосных сигналов просто необходимо учитывать концентрации электронов в ионосфере на момент проведения действий.

### Список литературы

1. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Справочник. Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007, 512 с.
2. Физика ионосферы. Б.Е.Брюнелли, А.А.Намгладзе. – М.: Наука, 1988, 528 с.
3. Ionosphere and applied aspects of radio communication and radar. Nathan Blaunstein, Eugeniu Plohotniuc. – CRC Press, 2008, 577 p.
4. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебник для вузов. 2-е изд., испр. Б.М.Петров – М.: Горячая линия-Телеком, 2007, 558 с.