

Т.А. СКВОРЦОВ, д-р техн. наук, с.н.с., Институт ионосферы, Харьков;
А.В. ФИСУН, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

ЭФФЕКТИВНАЯ ПОВЕРХНОСТЬ РАССЕЙНИЯ ЭЛЕКТРОНА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Получены соотношения для расчета поля, рассеянного электроном, а также его эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) с учетом влияния магнитного поля, в котором он находится. Показано, что в диапазоне радиочастот, на которых работают радары дистанционного зондирования ионосферы методом некогерентного рассеяния геомагнитное поле слабо влияет на ЭПР электрона.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, электрон, магнитное поле, ионосферная плазма, поляризация зондирующей волны.

Введение. Параметры некогерентно рассеянного (НР) ионосферой сигнала зависят от геомагнитного поля (ГМП). Зависимость поляризации, а также спектра такого сигнала от ГМП рассмотрены в работах [1], [2], [3]. Однако в известной литературе отсутствуют сведения о зависимости мощности рассеянного сигнала от ГМП. Известно, что ГМП влияет на движение электронов в ионосфере, а значит, оно должно влиять и на их эффективную поверхность рассеяния (ЭПР).

Поэтому **целью** данной работы является получение соотношений для вычисления ЭПР электрона, находящегося в магнитном поле, а также численная оценка влияния ГМП на ЭПР электрона в диапазоне работы радиолокатора НР.

Вывод основных соотношений. Пусть на первоначально неподвижный электрон падает волна, электрическое поле которой равно

$$\mathbf{E} = E_0 \exp\{jk_0 \mathbf{r} - \omega t\}, \quad (1)$$

где k_0 и \mathbf{r} – волновой вектор и радиус-вектор точки нахождения электрона.

Исходя из уравнения для силы Лоренца при гармонически изменяющихся величинах, получаем соотношение для комплексных векторных амплитуд

$$\mathbf{V} = -j\alpha(E_0 + \mathbf{V} \times \mathbf{B}), \quad (2)$$

где $\alpha = \frac{e}{m\omega}$, e , m – заряд и масса электрона. Записывая (2) в виде системы уравнений

$$\begin{aligned} V_x - j\alpha[V_y B_z - V_z B_y] &= -j\alpha E_x, \\ V_y - j\alpha[V_z B_x - V_x B_z] &= -j\alpha E_y, \\ V_z - j\alpha[V_x B_y - V_y B_x] &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

© Т.А. Скворцов, А.В. Фисун, 2013

и, решая эту систему, получим

$$\begin{aligned} V_x &= -j\alpha \frac{A_x E_x + \alpha C E_y}{A_x E_y + \alpha^2 C^2}, \\ V_y &= -j\alpha \frac{A_y E_y + \alpha C E_x}{A_x E_y + \alpha^2 C^2}, \\ V_z &= \alpha^2 \frac{(A_x B_y + \alpha C B_x) E_x + (A_y B_x + \alpha C B_y)}{A_x A_y + \alpha^2 C^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$A_x = (1 - \alpha^2 B_x^2); A_y = (1 - \alpha^2 B_y^2); A_z = (jB_z + B_x B_y).$$

Движение электрона можно рассматривать как эквивалентное элементарному току $\mathbf{j} = e\mathbf{V}$. Рассеянные им поля могут быть рассчитаны по векторному потенциалу $\mathbf{A}_S = \frac{\mathbf{j}}{cR}$, так, что $\mathbf{B}_S = \text{rot } \mathbf{A}_S$, $\mathbf{E}_S = -\mathbf{s} \times \mathbf{B}_S$.

Векторный потенциал рассеянной волны

$$\mathbf{A}_S = \mathbf{j} \frac{r_e}{k_s R} (E_0 + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \exp\{j\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{R}, \mathbf{t})\}, \quad (5)$$

где $\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{R}, \mathbf{t}) = k_0 \mathbf{r} + k_s(R - \mathbf{r}) - \omega t$, r_e – эффективный радиус электрона, k_s – волновой вектор рассеянной волны, \mathbf{R} – радиус-вектор определяющий точку наблюдения рассеянной волны.

Магнитное поле рассеянной волны определяется по формуле

$$\mathbf{B}_S = \text{rot} \mathbf{A}_S = -\frac{r_e}{R} [\mathbf{s} \times E_0 + \mathbf{s} \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) \exp\{j\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{R}, \mathbf{t})\}], \quad (6)$$

где \mathbf{s} – орт направления движения рассеянной волны, а ее электрическое поле определяется по формуле

$$\mathbf{E}_S = \frac{r_e}{R} \{ \mathbf{s} \times (\mathbf{s} \times E_0) + \mathbf{s} \times [\mathbf{s} \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B})] \} \exp\{j\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{R}, \mathbf{t})\}. \quad (7)$$

Пользуясь соотношениями (6), (7) можно определить вектор Пойнтинга

$$\mathbf{S}_M = \frac{c}{4\pi} [\mathbf{E}_S \times \mathbf{B}_S^*] \quad (8)$$

и ЭПР электрона с учетом влияния магнитного поля

$$\sigma_{eM} = \sigma_e \frac{\mathbf{S}_M}{S}, \quad (9)$$

где S и σ_e – плотность потока мощности и ЭПР электрона при отсутствии магнитного поля.

Частный случай. Для большинства практических случаев $\alpha B \ll 1$. Исключая слагаемые порядка $(\alpha B)^2$ в числителях и знаменателях (4) получим

$$V_x = -j\alpha E_x + \alpha^2 B_z E_y V_y = -\alpha^2 B_z E_x - j\alpha E_y V_z = 0. \quad (10)$$

Рассмотрим волну, рассеянную в обратном направлении. Тогда, с учетом малости слагаемых порядка $(\alpha B)^2$ из (6), (7), (8) получим

$$\mathbf{E}_S = -\frac{r_e}{R} \left\{ \mathbf{x}_0 (E_x + j\alpha B_z E_y) + \mathbf{y}_0 (E_y + j\alpha B_z E_x) \right\} \exp\{j\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{R}, \mathbf{t})\}, \quad (11)$$

$$\mathbf{B}_S = -\frac{r_e}{R} \left\{ \mathbf{y}_0 (E_x - j\alpha E_y B_z) - \mathbf{x}_0 (E_y + j\alpha E_x B_z) \right\} \exp\{j\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{R}, \mathbf{t})\}, \quad (12)$$

где $\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0$ – орты, ортогональные друг другу и волновому вектору первичной волны, Φ – разность фаз между ортогональными составляющими вектора поля первичной (падающей) волны.

Из (8), (11) и (12) получаем плотность потока мощности

$$|S_M| = \frac{c}{4\pi} \left(\frac{r_e}{R} \right)^2 \left(|\mathbf{E}_x|^2 + |\mathbf{E}_y|^2 - 2\alpha B_z |\mathbf{E}_x| \cdot |\mathbf{E}_y| \sin \varphi \right). \quad (13)$$

При отсутствии магнитного поля (13) сводится к известному результату [1]

$$|S| = \frac{c}{4\pi} \left(\frac{r_e}{R} \right)^2 \left(|E_x|^2 + |E_y|^2 \right). \quad (14)$$

Поскольку ЭПР в данном рассмотрении пропорционально плотности потока мощности, то из (13) и (14) получаем ЭПР электрона, находящегося в магнитном поле

$$\sigma_{eM} = \sigma_e \left(1 - \frac{2\alpha B_z |E_x| |E_y| \sin \varphi}{|E_x|^2 + |E_y|^2} \right), \quad (15)$$

где σ_e – ЭПР электрона при отсутствии магнитного поля.

Заклучение. Полученные соотношения позволяют определить поле волны рассеянной электроном, а также его ЭПР, с учетом влияния магнитного поля.

Как видно из соотношения (15) ЭПР электрона, а значит и объем ионосферной плазмы, зависит от поляризации волны зондирующего радиоимпульса. В частности для линейной поляризации получаем равенство $\sigma_{eM} = \sigma_e$, а для круговой поляризации

$$\sigma_{eM} = \sigma_e (1 \pm \alpha B_z). \quad (16)$$

Например, на рабочей частоте харьковского радиолокатора НР $\sigma_{eM} = \sigma_e (1 \pm 0,008)$ так, что ЭПР электрона на левой и правой круговой поляризациях отличаются приблизительно в 1,016 раз.

Для большинства практических задач зависимость ЭПР электрона от ГМП можно считать пренебрежимо малой.

Список литературы: 1. Брунелли Б.Б., Кочкин М.И., Пресняков И.Н. и др. Метод некогерентного рассеяния радиоволн. – Л.: Наука, 1979. – 188 с. 2. Брунелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 522 с. 3. Ткачев Г.Н. Карлов В.Д. Измерение разности фаз между обыкновенными и необыкновенными компонентами сигнала, рассеянного на тепловых флуктуациях электронной концентрации ионосферы // Вестник Харьковского политехнического института. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. – 1981. – № 183, вып. 3. – С. 18–27.

Поступила в редколлегию 19.11.2013

УДК 550.380

Эффективная поверхность рассеяния электрона в магнитном поле / Т.А. Скворцов, А.В. Фисун // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 8-11. Бібліогр.: 3 нав.

Отримані співвідношення для розрахунку поля, яке було розсіяне електроном, а також його ефективна поверхня розсіяння (ЕПР) з врахуванням впливу магнітного поля, в якому він знаходиться. Показано, що в діапазоні роботи радарів дистанційного зондування іоносфери методом некогерентного розсіяння геомагнітного поля слабо впливає на ЕПР електрона.

Ключові слова: радар некогерентного розсіяння, електрон, магнітне поле, іоносферна плазма, поляризація зондувальної хвилі.

Correlations for the calculation of the field that scattered by electron and his cross section (CS) in magnetic response are got. It is shown that in the bandwidth of work of radars of the remote sensing of ionosphere by the method of incoherent scattering the geomagnetic field slight impact on CS of electron.

Keywords: radar of incoherent scatter, electron, magnetic field, ionospheric plasma, polarization of sounding wave.