

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

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДАРОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ИОНОСФЕРЕ**

Розглянуто спосіб вимірювання магнітного поля Землі в іоносфері, який засновано на використанні поляризаційних ефектів. При цьому радар некогерентного розсіяння використовується сумісно зі станцією вертикального зондування іоносфери. Отримано формули для оцінки якості вимірювань.

Рассмотрен способ измерения магнитного поля Земли в ионосфере, основанный на использовании поляризационных эффектов. При этом радар некогерентного рассеяния используется совместно со станцией вертикального зондирования ионосферы. Получены формулы для оценки качества измерения.

The method of measuring of magnetic-field of Earth in an ionosphere based on the use of polarization effects is considered. Thus radar of non-coherent scattering together with the station of the vertical sounding of ionosphere is used. Formulas for the estimation of measuring quality are got.

**Введение.** Исследование процессов, происходящих в геомагнитном поле (ГМП) представляет важный, как познавательный, так и практический интерес. ГМП экранирует поверхность Земли от вредных излучений, влияет как на живые организмы, так и на работу технических систем.

В настоящее время для исследования и мониторинга ГМП используются измерительные средства, расположенные на поверхности Земли, а также на искусственных спутниках Земли (ИСЗ). При этом высоты нижних слоев ионосферы, вплоть до ионосферного максимума, практически выпадают из области непосредственного наблюдения.

В то же время ГМП меняется как в пространстве, так и во времени и токи, протекающие в ионосфере, играют в этом немаловажную роль. При этом можно предположить, что в области протекания указанных токов ГМП существенно отличается как от поля на поверхности Земли, так и от поля в невозмущенных областях.

Следует, также, отметить, что из-за движения ИСЗ приборы, расположенные на них, не могут обеспечить непрерывного наблюдения вариаций ГМП в фиксированной области пространства.

Известно, что магнитосфера и ионосфера Земли являются сложной взаимодействующей системой, которая должна исследоваться и исследуется как таковая. Так, например, при некоторых исследованиях ионосферы методом некогерентного рассеяния (НР) используются данные о параметрах ГМП. Указанные данные, к сожалению, являются глобально

усредненными, поскольку существующая система мониторинга ГМП не позволяет непрерывно получать данные о текущих параметрах ГМП в области главного луча радара НР.

В этих условиях представляет интерес тот факт, что обсерватории оборудованные радаром НР из потребителей информации о ГМП могут превратиться в ее “поставщиков”, обеспечивая непрерывное измерение продольной составляющей напряженности ГМП в главном луче на всех высотах существования достаточно плотной ионосферы.

**Целью статьи** является рассмотрение возможностей способа измерения ГМП в ионосфере с использованием поляризационных эффектов, наблюдаемых в рассеянных ионосферой сигналах на радаре НР. При этом одновременно с радаром используется станция вертикального зондирования ионосферы [1].

**Способ измерения ГМП и формулы для оценки качества измерений.** Известно, что при прохождении радиоволны интервала пути  $[h_1, h_2]$  в подмагнитной плазме возникает разность фаз между сигналами обыкновенной и необыкновенной волн [2]

$$\Phi = k \int_{h_1}^{h_2} H(h)N(h)dh, \quad (1)$$

где  $N(h) = N_M F(h)$  – профиль электронной концентрации по высоте  $h$ ,  $k$  – известная константа,  $N_M$  – электронная концентрация в ионосферном максимуме,  $F(h)$  – нормированный профиль электронной концентрации,  $H(h)$  – напряженность продольной составляющей ГМП. Заметим, что данная формула описывает и угол поворота плоскости поляризации волны (эффект Фарадея).

В соответствии с теоремой о среднем значении на некоторой высоте заданного интервала существует такое значение  $h_x$ , что

$$\Phi = kH(h_x) \int_{h_1}^{h_2} N(h)dh. \quad (2)$$

Таким образом, из (2) имеем

$$H(h_x) = \frac{\Phi}{kN_M I}, \quad (3)$$

где

$$I = \int_{h_1}^{h_2} F(h)dh. \quad (4)$$

Как видно из (3), если измерить разность фаз, нормированный профиль электронной концентрации и максимальную концентрацию, то можно вычислить напряженность ГМП на некоторой высоте внутри заданного интервала высот. Первые две величины определяют известным образом по данным измерений радара НР, а концентрацию электронов в

ионосферном максимуме – по данным станции вертикального зондирования

Таким образом, получается оценка

$$\hat{H}(h_x) = \frac{\hat{\Phi}}{k\hat{N}_M\hat{I}}, \quad (5)$$

где  $\hat{H} = H + \varepsilon_H$ ,  $\hat{\Phi} = \Phi + \varepsilon_\Phi$ ,  $\hat{N}_M = N_M + \varepsilon_N$ ,  $\hat{I} = I + \varepsilon_I$ ,

Полагая ошибки измерения  $\varepsilon_\Phi$ ,  $\varepsilon_I$ ,  $\varepsilon_H$ ,  $\varepsilon_N$  малыми, из (5) получим

$$H + \varepsilon_H \approx \frac{\Phi + \varepsilon_\Phi}{kN_M I} \left(1 - \frac{\varepsilon_N}{N_M}\right) \left(1 - \frac{\varepsilon_I}{I}\right) \approx H + H \left(\frac{\varepsilon_\Phi}{\Phi} - \frac{\varepsilon_N}{N_M} - \frac{\varepsilon_I}{I}\right), \quad (6)$$

откуда при условии взаимной некоррелированности ошибок получаем относительную дисперсию ошибки измерения продольной составляющей напряженности ГМП на высоте  $h_x$

$$\frac{\sigma_H^2}{H^2} = \frac{\langle \varepsilon_\Phi^2 \rangle}{H^2} \approx \frac{\sigma_\Phi^2}{\Phi^2} + \frac{\sigma_N^2}{N^2} + \frac{\sigma_I^2}{I^2}, \quad (7)$$

где  $\sigma_\Phi^2$ ,  $\sigma_N^2$ ,  $\sigma_I^2$  – соответственно, дисперсии ошибок определения разности фаз, концентрации электронов в максимуме ионизации ионосферы и интеграла (4).

Оценка параметра  $\Phi$  формируется как разность  $\hat{\Phi} = \hat{\psi}_2 - \hat{\psi}_1$ , где  $\hat{\psi}_2$  и  $\hat{\psi}_1$  – оценки разности фаз между сигналами обыкновенной и необыкновенной волн для высот  $h_2$  и  $h_1$ , соответственно. Можно полагать, что ошибки оценки указанных разностей фаз некоррелированы. Тогда

$$\sigma_\Phi^2 = \sigma_{\psi_1}^2 + \sigma_{\psi_2}^2, \quad (8)$$

где  $\sigma_{\psi_1}^2$  и  $\sigma_{\psi_2}^2$  – дисперсии ошибок измерений  $\psi_2$  и  $\psi_1$ .

При достаточно сильном изменении ГМП в пределах интервала высот  $\delta h = h_2 - h_1$  и достаточно высоких требованиях к точности привязки измеренной напряженности ГМП к высоте существенной может быть ошибка, возникающая из-за неопределенности высоты  $h_x$ .

Рассмотрим дисперсию ошибки измерения напряженности ГМП с учетом указанной дополнительной составляющей. Закон изменения напряженности ГМП в пределах данного интервала можно представить рядом Тейлора. Ограничиваясь линейной аппроксимацией получим

$$H(h) \approx H_0 + \frac{1}{2}\gamma(h - h_0), \quad (9)$$

где  $H_0$  – напряженность на высоте  $h_0 = \frac{h_1 + h_2}{2}$ ,  $\gamma = \frac{dH}{dh}$  – вертикальный градиент продольной составляющей напряженности магнитного поля.

Тогда

$$\Phi = kH_0 N_M I + \frac{1}{2} k \gamma N_M I_1, \quad (10)$$

где  $I_1 = \int_{h_1}^{h_2} F(h)(h - h_0) dh$ , откуда получаем

$$H_0 = \frac{\Phi}{k N_M I} - \gamma \frac{I_1}{2I} = H(h_x) - \gamma \frac{I_1}{2I}. \quad (11)$$

Таким образом, при наличии градиента напряженности появляется смещение оценки, равное

$$\beta = \gamma \frac{I_1}{2I}$$

и вместо выражения (6) имеем

$$H + \varepsilon_H \approx H + H \left( \frac{\varepsilon_\Phi}{\Phi} - \frac{\varepsilon_N}{N_M} - \frac{\varepsilon_I}{I} \right) - \beta. \quad (12)$$

Поскольку это смещение является неизвестной случайной величиной, то при вычислении среднего квадрата ошибки измерений из выражения (12) получаем

$$\frac{\sigma_H^2}{H^2} \approx \frac{\sigma_\Phi^2}{\Phi^2} + \frac{\sigma_N^2}{N_M^2} + \frac{\sigma_I^2}{I^2} + \frac{\beta^2}{H^2}. \quad (13)$$

Формулу (13) можно конкретизировать, принимая аппроксимацию

$$F(h) \approx F(h_0) + a(h - h_0) + b(h - h_0)^2. \quad (14)$$

Тогда

$$\frac{\sigma_H^2}{H^2} \approx \frac{\sigma_\Phi^2}{\Phi^2} + \frac{\sigma_N^2}{N_M^2} + \frac{\sigma_I^2}{I^2} + \left( \frac{\gamma}{H} \frac{a(\delta h)^2}{12F(h_0)} \right)^2. \quad (15)$$

Таким образом, в принятом приближении смещение оценки вызывается только линейной составляющей высотного профиля в выражении (14) электронной концентрации.

Важно отметить, что рассмотренный способ позволяет измерять не только вариации напряженности ГМП, но и ее абсолютное значение. При этом, как показывают предварительные оценки, при накоплении в течение

одной и более минут способ может обеспечить точность измерений, соизмеримую с возмущениями ГМП во время магнитных бурь.

Важно, также, отметить, что отражения от космического мусора, которые существенно влияют на данные радаров НР, практически отсутствуют на дальностях, соответствующих высотам ионосферы ниже ионосферного максимума.

**Возможности реализации измерений ГМП.** Рассмотрим некоторые вопросы реализации измерений ГМП с учетом особенностей радара НР, расположенного под Харьковом. Наиболее эффективными способами измерения параметра  $\Phi$ , являются способы с двухканальным приемом рассеянного сигнала в полном поляризационном базисе, например, в круговом базисе [3]. Возможности такого измерения имеются, в частности в харьковском радаре НР, который имеет соответствующую антенну с ортогональными вибраторами и волноводный мост в тракте СВЧ. При этом измерения можно проводить как в круговом, так и в линейном поляризационных базисах.

Поскольку один канал приема уже задействован в штатном режиме с использованием круговой поляризации, то целесообразным может быть использование кругового базиса и при поляризационных двухканальных измерениях. При этом приемник, подключенный ко второму выходу моста вместо согласованной нагрузки, не нарушает штатного режима работы, а дополнительный канал приема может оказаться полезным не только для проведения описанных магнитных измерений, но и для контроля настройки передающей антенны на круговую поляризацию, для обнаружения мешающих отражений и для других целей.

Наиболее эффективные поляризационные измерения обеспечивает использование короткого зондирующего сигнала с линейной поляризацией. Именно такой сигнал обеспечивает наиболее высокую взаимную корреляцию сигналов обыкновенной и необыкновенной волн.

Поэтому весьма благоприятным оказывается то, что в настоящее время в радаре используется зондирующий сигнал, состоящий из длинного и короткого импульсов, причем в штатном режиме используется длинный импульс.

Таким образом, желательный перевод радара из режима излучения круговой поляризации в коротком импульсе в режим излучения линейной поляризации (в этом же импульсе) может быть реализован без нарушения штатного режима работы.

Нормированный профиль электронной концентрации  $F(h)$  в нижних слоях ионосферы также, по-видимому, целесообразно измерять с использованием короткого импульса. При достаточно точно известных значениях температур компонент плазмы для этого используются данные измерений мощности рассеянного сигнала в канале короткого импульса,

который обеспечивает высокую разрешающую способность. Если же такие данные отсутствуют, то можно использовать способы непосредственного измерения электронной концентрации  $N(h)$ , построенные на основе измерений зависимости параметра  $\Phi(h)$  от высоты, например, способ, описанный в [3].

**Выводы.** Следует, по-видимому, ожидать, что актуальность вопросов исследования ГМП в ионосфере и вопросов ионосферно-магнитосферных связей будет возрастать. В этих условиях радары НР могут оказаться уникальным и незаменимым средством наблюдения и измерения.

Особенности радара НР, расположенного под Харьковом, создают благоприятные условия для внедрения описанного способа. При этом штатный режим работы радара не нарушается.

**Список литературы:** 1. Патент на корисну модель №71162 від 10.07.2012. Спосіб вимірювання параметрів іоносфери і магнітосфери / Л.Я. Ємельянов, Т.О. Скворцов, І.Б. Склярів, А.В. Фисун; власник Інститут іоносфери НАН та МОНмолодьспорту України, Бюл. №13. 2. Брюнелли Б.Е. Физика ионосферы / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе – М: Наука, 1988. – 528 с. 3. Ткачев Г.Н. Измерение разности фаз между флуктуирующими сигналами, принятыми на ортогонально поляризованные антенны / Г.Н. Ткачев, Т.А. Скворцов, В.Д. Карлов // Радиотехника. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – Вып. 60. – Х.: Изд. при ХГУ “Вища школа”, 1982. – С. 57 – 67.

*Поступила в редколлегию 19.09.2012*