

**ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ
НА РАДАРЕ ИНСТИТУТА ИОНОСФЕРЫ****Введение**

Точность ионосферных измерений существенным образом определяется интенсивностью принятого сигнала. При некогерентном рассеянии (НР) радиоволн в ионосфере интенсивность рассеяния в обратном направлении зависит от локальных параметров плазмы и величины рассеивающего объема, который определяется длительностью зондирующего импульса и диаграммой направленности антенны. Для получения информации о параметрах ионосферы в достаточно широком диапазоне высот могут использоваться радары с импульсной мощностью не менее одного мегаватта и антенной с эффективной поверхностью в несколько тысяч квадратных метров, что определяется объемным характером распределения рассеивателей. Не менее важным элементом является организация работы системы обработки сигнала с использованием гибкого программно-алгоритмического обеспечения.

На радаре НР Института ионосферы проводится корреляционная обработка сигналов, выделенных квадратурными каналами радиоприемного устройства с применением синхронного детектирования и фильтрации. По массиву измеренных корреляционных функций НР сигнала определяют высотное распределение температур ионов и электронов, ионный состав, а также радиальную составляющую скорости движения ионосферной плазмы.

Цель работы – сравнение систем корреляционной обработки НР сигналов на видео- и промежуточных частотах и описание разработанной системы, позволяющей проводить обработку сигналов (спектральную и/или корреляционную) с использованием записей оцифрованных значений непосредственно с выхода усилителя промежуточной частоты.

Обработка НР сигналов на видеочастоте

На выходе синхронного детектора (СД) сигнал зависит от разности фаз между принятым НР сигналом и сигналом синхронного гетеродина. Она носит случайный характер с равномерным законом распределения. Применением квадратурных каналов СД решают сразу две задачи: уменьшают относительную дисперсию оценки автокорреляционной функции (АКФ) сигнала НР и создают возможность измерения скорости движения ионосферной плазмы.

Обработка данных включает в себя определение АКФ НР сигнала $R_j^*(\tau_k)$ как разность оценки АКФ смеси сигнал+шум на j -м исследуемом участке дальности, протяженность которого определяется длительностью зондирующего импульса, и оценки АКФ шума, усредненной по ряду измерений в конце радиолокационной развертки дальности, где уровень НР сигнала пренебрежимо мал:

$$R_j^*(\tau_k) = R_{j(s+n)}^*(\tau_k) - \overline{R_n^*(\tau_k)}.$$

Для упрощения записи индекс «*» ниже будет опущен.

Процесс обработки сигнала на каждом из участков дальности может быть сведен к тому, что АКФ НР сигнала определяют в каждом из двух квадратурных каналов и вычисляют

$$R_{\text{Re}}(t_j, \tau_k) = R_{11}(t_j, \tau_k) + R_{22}(t_j, \tau_k), \quad (1)$$

получая после нормировки оценку «действительной» составляющей нормированной АКФ НР сигнала $r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)$, где t_j – радиолокационная задержка, соответствующая высоте $h_j = ct_j/2$ при вертикальном зондировании, $\tau_k = k\Delta\tau$, k и $\Delta\tau$ – номер ординаты АКФ и шаг по задержке соответственно. В выражении (1) $R_{11}(t_j, \tau_k) = \overline{u_1(t_j) u_1(t_j + \tau_k)}$, $R_{22}(t_j, \tau_k) = \overline{u_2(t_j) u_2(t_j + \tau_k)}$

индексы 1 и 2 соответствуют номеру квадратурного канала приемника.

Так как скорость движения плазмы пренебрежимо мала, составляющая $r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)$ может быть использована для определения параметров ионосферы, таких как температуры ионов T_i и электронов T_e , ионного состава, электронной концентрации N_e .

В общем случае определение АКФ НР сигнала производится с учетом «мнимой» составляющей $R_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)$:

$$R(t_j, \tau_k) = \sqrt{R_{\text{Re}}^2(t_j, \tau_k) + R_{\text{Im}}^2(t_j, \tau_k)}.$$

Составляющая $R_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)$ определяется в виде разности взаимных корреляционных функций сигналов квадратурных каналов:

$$R_{\text{Im}}(t_j, \tau_k) = R_{12}(t_j, \tau_k) - R_{21}(t_j, \tau_k),$$

где $R_{12}(t_j, \tau_k) = \overline{u_1(t_j) u_2(t_j + \tau_k)}$, $R_{21}(t_j, \tau_k) = \overline{u_2(t_j) u_1(t_j + \tau_k)}$.

Вертикальную составляющую скорости плазмы V_z вычисляют согласно выражению [1]:

$$V_z(h_j) = -\frac{\lambda}{4\pi n} \sum_{k=1}^n \frac{1}{\tau_k} \left[\arctg \frac{R_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)}{R_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)} - \arctg \frac{R_{\text{Im}}(t_j, 0)}{R_{\text{Re}}(t_j, 0)} \right], j=1, 2, \dots, N,$$

где λ – рабочая длина волны радара НР, n – количество используемых при вычислениях V_z значений АКФ, N – количество участков дальности.

Отметим, что измерение скорости движения плазмы требует соблюдения идентичности квадратурных каналов.

Регистрация доплеровского сдвига и асимметрии спектра НР сигнала

НР сигнал представляет собой узкополосный случайный процесс ($2\Delta f_s / f_0 \approx 10^{-4}$, где $2\Delta f_s$ – ширина спектра, f_0 – несущая частота радара). Поэтому доплеровское смещение $f_d = -2V_z / \lambda$ практически не приводит к появлению асимметрии его спектра, характер которого, согласно представлениям о распределении скоростей частиц в плазме в отсутствие внешних воздействий, близок к симметричному (рис. 1, а).

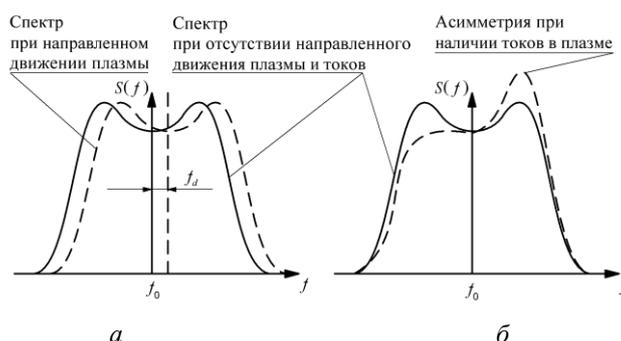


Рис. 1. Примеры спектров: а – доплеровское смещение спектра относительно несущей частоты; б – асимметричный спектр

Асимметрия спектра рассеяния (рис. 1, б) может наблюдаться при любых нарушениях симметрии распределения заряженных частиц по скоростям. Она, в частности, возникает при наличии токов в плазме [2].

Для выявления асимметрии спектра при использовании синхронного детектирования требуются дополнительные вычисления, которые сводятся к оценке вида взаимной корреляционной функции квадратурных каналов. Такие вычисления необходимы при аномальных

явлениях в ионосферной плазме (в условиях невозмущенной среднеширотной ионосферы, как правило, спектр некогерентного рассеяния симметричен [3]). Но и в этом случае необходимо соблюдение идентичности квадратурных каналов.

Асимметрию спектра рассеяния достаточно уверенно можно обнаружить при спектральной обработке НР сигнала на промежуточной частоте.

Однако по измеренному спектру трудно определить его доплеровское смещение, так как оно составляет всего лишь 10^{-3} – 10^{-4} от ширины спектра рассеяния. Измерения доплеровского смещения при корреляционной обработке, наоборот, эффективны [4–6].

Отсюда следует, что отсутствие информационных потерь может быть обеспечено использованием одновременно и корреляционной и спектральной обработки сигнала на промежуточной частоте.

Учет состояния ионосферной плазмы в широком диапазоне высот

В ионосфере ионный состав изменяется с высотой. Так, на высотах вблизи максимума ионизации доминируют ионы кислорода O^+ , и спектр НР сигнала достаточно узок: при длине волны $\lambda = 2$ м он не превышает 10 кГц. С увеличением высоты возрастают температуры заряженных частиц, и все большее влияние на характер рассеяния оказывают легкие ионы (H^+ и He^+). Спектр расширяется, а интервал корреляции соответственно уменьшается (рис. 2). Спектр НР сигнала, рассеянного на высотах 600 км и выше, может стать почти в четыре раза шире.

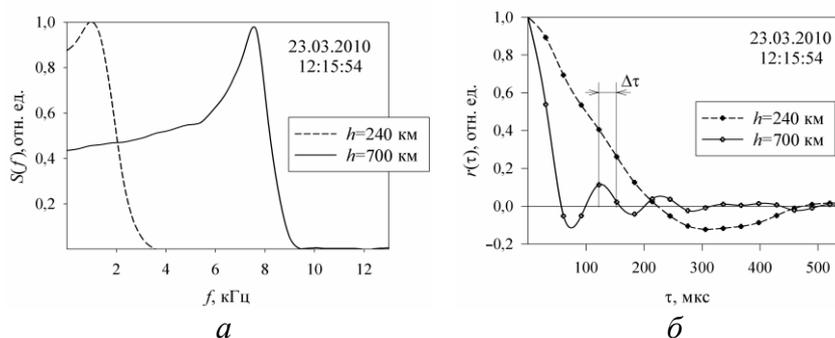


Рис. 2. Пример спектров и АКФ НР сигнала для высот вблизи максимума ионизации (пунктир) и внешней ионосферы (сплошная линия), измеренных с помощью радара НР Института ионосферы в условиях низкой активности Солнца, характеризующихся наибольшими изменениями ионосферных параметров по высоте

Используя результаты, приведенные в работе [4], можно получить оценки ширины спектра рассеяния $2\Delta f_s$ и интервала корреляции $\tau_{\text{корр}}$:

$$2\Delta f_s = \frac{1,24}{\lambda} \sqrt{\frac{T_i}{m_i}}, \text{ кГц}; \quad \tau_{\text{корр}} \approx 3\lambda \sqrt{\frac{m_i}{T_e}}, \text{ мс},$$

где λ , $T_{i,e}$, m_i – соответственно в метрах, градусах Кельвина и в единицах атомного веса. Характеристики плазмы в ионосфере изменяются существенно. В качестве примера в таблице приведены результаты расчетов ширины спектра и интервала корреляции с использованием международной справочной модели IRI-2001 для дневных значений в условиях максимума солнечной активности [4]).

Длина волны $\lambda \approx 2$ м используется на радаре НР Института ионосферы, $\lambda \approx 0,75$ м – на радаре НР Массачусетского технологического института (США).

Практика ионосферных измерений показывает, что оптимальное количество корреляционных каналов, определяемое интервалом корреляции и видом измеряемой АКФ НР сигнала, лежит в интервале 18–20 независимо от длины рабочей волны. При $\lambda \approx 2$ м оптимальный шаг Δt для высот вблизи максимума ионизации и ниже составляет 30–40 мкс, а для высот, где преобладают ионы водорода, – около 10 мкс.

| h , км | $2\Delta f_s$, кГц | | $\tau_{\text{корт}}$, мс | |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|
| | $\lambda=2$ м | $\lambda=0,75$ м | $\lambda=2$ м | $\lambda=0,75$ м |
| 200 | 5 | 13 | 1,3 | 0,5 |
| 300 | 5 | 13 | 1,3 | 0,5 |
| 500 | 23 | 61 | 0,7 | 0,26 |
| 700 | 28 | 75 | 0,6 | 0,23 |
| 1000 | 33 | 88 | 0,45 | 0,17 |

Отсюда следует, что коррелометр с фиксированным алгоритмом работы не оптимален для определения высотного распределения параметров ионосферы при наблюдениях одновременно в большом интервале высот, например от 120 до 1500 км.

Одно из возможных решений было заложено в системе обработки СКИФ [4]. Предусматривалась работа с составным сигналом, элементы которого и алгоритм их обработки выбирались в соответствии с высотным строением ионосферы.

Представляется, что более эффективное устранение отмеченного недостатка может быть осуществлено при записи оцифрованных значений смеси сигнал+шум на выходе радиоприемного устройства. Последующее использование полученных массивов позволяло бы применять альтернативные варианты обработки с использованием высокопроизводительных ПК. Это может быть, в частности, корреляционная или спектральная обработка с оптимизированными (для каждого конкретного высотного диапазона и состояния ионосферы) параметрами.

При использовании синхронного детектирования и корреляционной обработки информационные потери можно сократить за счет изменения шага дискретизации, однако при этом выявление асимметрии спектра значительно усложняет процедуру обработки НР сигнала [7].

Система приема и обработки сигналов на промежуточной частоте

Чтобы все же создать возможность выявления асимметрии спектра, например с помощью методик, приведенных в [5, 7, 8], предлагается осуществлять аналого-цифровое преобразование непосредственно на выходе усилителя промежуточной частоты (ПЧ). При этом импульсы опроса формируются с использованием сигнала синхронного гетеродина и, следовательно, жестко привязаны к ПЧ [5]. Запись дискретных отсчетов сигнала осуществляется под управлением системы синхронизации радара.

Функциональная схема системы приема, преобразования и обработки сигнала на ПЧ применительно к радару НР Института ионосферы представлена на рис 3. На схеме выделены блоки, которые необходимо добавить к существующей системе, описанной в [9].

Система работает следующим образом.

Принятый сигнал подается на вход УВЧ приемника. В приемном тракте осуществляется усиление и преобразование НР сигнала, в результате которого его спектр переносится на вторую ПЧ (около 1 МГц). Сигналы гетеродинов с частотами $f_{Г1}$ и $f_{Г2}$ формируются таким образом, что при отсутствии доплеровского сдвига центральная частота спектра сигнала на ПЧ ($f_{ПЧ2}$) равна частоте синхронного гетеродина $f_{СГ}$. С выхода приемника преобразованный сигнал поступает на вход АЦП. Формирователь импульсов опроса вырабатывает парные импульсы с интервалом, равным четверти периода сигнала синхронного гетеродина. Таким образом, соответствующие им отсчеты сигнала НР находятся в квадратурной зависимости.

Парные отсчеты следуют с периодом, равным шагу задержки Δt (см. рис. 2), который задается программно с учетом ожидаемого характера АКФ НР сигнала на соответствующих высотах: в пределах развертки дальности шаг Δt может быть выбран, например, 40 мкс для области, где доминируют ионы кислорода O^+ , или 10 мкс для области, где доминируют ионы водорода H^+ .

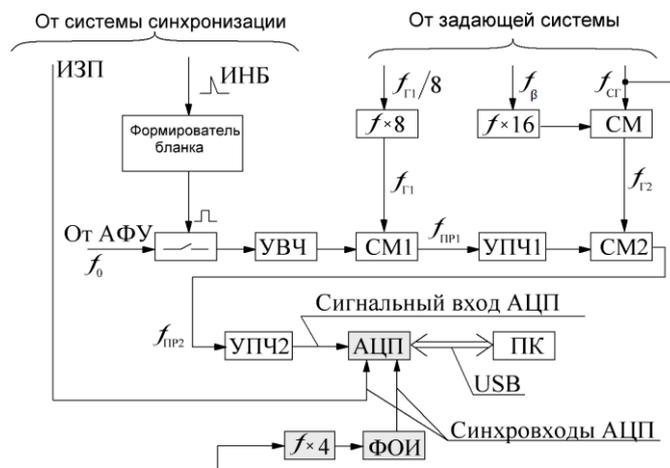


Рис. 3. Функциональная схема системы приема, преобразования и обработки сигнала. Здесь АФУ – антенно-фидерное устройство, УВЧ – усилитель высокой частоты; СМ – смеситель; УПЧ – усилитель промежуточной частоты, $[f \times 4]$ – блок умножителя частоты на 4; ФОИ – формирователь импульсов опроса АЦП; ИЗП – импульс запуска передатчика; ИБН – импульс начала бланка

Возможность использования библиотеки альтернативных алгоритмов обработки, выбираемых в зависимости от конкретной задачи ионосферных измерений, а также алгоритмов, реализующих цифровую фильтрацию и обработку [10–12], обеспечивает, в конечном итоге, уменьшение дисперсии оценок измеряемых параметров ионосферы.

Выводы

Предлагаемый способ оцифровки значений сигнала на выходе усилителя промежуточной частоты позволяет избавиться от недостатков, присущих системам с фиксированным алгоритмом обработки, а также исключить применение аналоговых элементов для формирования квадратурных каналов. Таким образом, открывается возможность проводить и спектральную, и корреляционную обработку НР сигнала, учитывать ширину спектра рассеяния на разных высотах, выявлять и оценивать асимметрию спектра, которая может свидетельствовать о реакции ионосферы на возмущение.

Список литературы: 1. *Yemelyanov, L.Ya., Dzyubanov, D.A.*. The Peculiarities of Mid-Latitude Ionosphere Plasma Drift Velocity Determination // *Telecommunications Radio Engineering*. – 2007. – Vol. 66, № 14. – P. 1313–1327. 2. *Rosenbluth, M.N., Rostoker, N.* Scattering of electromagnetic waves by a non-equilibrium plasma // *Phys. Fluids*. – 1962. – Vol. 5, № 7. – P. 776–788. 3. *Evans, J.V., Brockelman, R.A., Julian, R.F. et al.* Determination of F-region vertical drifts at Millstone Hill // *Radio Sci.* – 1970. – Vol. 5, № 1. – P. 27–38. 4. *Рогожкин, Е.В., Пуляев, В.А., Лысенко, В.Н.* Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния: монография. – Х. : НТУ «ХПИ», 2008. – 256 с. 5. *Рогожкин, Е.В.* Измерение параметров ионосферной плазмы по корреляционной функции сигнала некогерентного рассеяния / *Ионосферные исследования*. – 1979. – № 27. – С. 46–59. 6. *Емельянов, Л.Я., Григоренко, Е.И., Скляр, И.Б.* Радиофизические наблюдения вертикального дрейфа плазмы в области F ионосферы на харьковском радаре некогерентного рассеяния // *Радиотехника*. – 2004. – Вып. 136. – С. 102–108. 7. *Rino, C.L.* Radar measurement of ionosphere motion in the presence of current-induced spectral asymmetries // *Radio Sci.* – 1972. – Vol. 7, № 11. – P. 1049–106. 8. *Щербаков, А.А., Медведев А.В., Кушнар в Д.С.* Анализ состояния среднеширотной внешней ионосферы по данным наблюдений на иркутском радаре НР // *Солнечно-земная физика*. – 2010. – Вып. 16. – С. 3–8. 9. *Емельянов, Л.Я.* Радиоприемное устройство радара некогерентного рассеяния // *Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Сб. науч. тр.* – Харьков, 1999. – Вып. 31. – С. 108–112. 10. *Хемминг, Р.В.* Цифровые фильтры. – М. : Сов. радио, 1980. – 224 с. 11. *Грибанов, Ю.И., Мальков, В.Л.* Спектральный анализ случайных процессов. – М. : Энергия, 1974. – 240 с. 12. *Глинченко, А.С.* Цифровая обработка сигналов. Ч. 1, 2. – Красноярск : Изд-во КГТУ, 2001. – 199 с.

*Институт ионосферы НАН и МОН Украины,
Национальный технический университет «ХПИ»*

Поступила в редколлегию 24.06.2015