

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ ФОТОМЕТРА ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ С ИРКУТСКИМ РАДАРом НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

И.Д. Ткачев, Р.В. Васильев, В.Е. Заруднев

RESEARCH AND ASSESSMENT OF SOME KEY PARAMETERS OF THE PHOTOMETER FOR JOINT ACTION WITH IRKUTSK INCOHERENT SCATTER RADAR

I.D. Tkachev, R.V. Vasilyev, V.E. Zarudnev

Разработан макет фотометра для совместной (синхронной) работы с иркутским радаром некогерентного рассеяния. Актуальность разработки устройства определяется в первую очередь фотометрическим сопровождением экспериментов по исследованию нелинейного взаимодействия мощных радиоволн в ионосферной плазме, а также необходимостью синхронной фотометрии при наблюдении орбитальных аппаратов и проведении штатных сеансов ионосферных наблюдений. Для увеличения чувствительности при определении светового потока фотометр использует фотоэлектронный умножитель, работающий в режиме счета фотонов. Проведено тестирование ключевых параметров фотометра и выработан ряд рекомендаций для реализации действующего образца установки.

The photometer model is developed for joint (synchronous) work with the Irkutsk radar of incoherent dispersion. Relevance of development of the device is defined first of all by photometric support of experiments of research of nonlinear interaction of powerful radio waves in ionospheric plasma, and also synchronous photometry at supervision of orbital devices and carrying out regular sessions of ionospheric supervision. For increase in sensitivity when determining a light stream the photometer uses the photomultiplier tube working in the mode of the account of photons. Testing of key parameters of a photometer is held and a number of recommendations for realization of the operating model of installation is developed.

Введение

Ионосферная плазма, находящаяся в магнитном поле Земли, является нелинейной средой для распространяющихся в ней радиоволн. Наиболее явно нелинейные эффекты в ионосферной плазме проявляются в экспериментах с мощным коротковолновым излучением, частота которого приближается к частотам плазменных резонансов [Гуревич, 2007; Фролов, 2007]. Воздействие мощных КВ радиоволн на ионосферную плазму вызывает в ней ряд эффектов, в результате которых меняются условия распространения радиоволн, модифицируется частотный спектр радиоволн [Kroll, 1964; Stansfield, 1971]. В основном эти явления связаны с резонансным увеличением энергии электронов плазмы под действием мощного КВ радиоизлучения.

Мощное УКВ радиоизлучение вследствие того, что область плазменных резонансов находится на более низких частотах, не может напрямую вызывать явления связанные с резонансным увеличением энергии электронов ионосферной плазмы. Однако УКВ радиоизлучение модулированное частотой близкой к частоте резонансов (1—10 МГц) формально может с некоторой эффективностью передавать энергию низкочастотной составляющей электронам плазмы находящимся в резонансной области [Weyl, 1970; Dysthe, 1978; Lavergnat, 1977]. Таким образом, используя модулированное УКВ радиоизлучение можно попытаться вызвать эффекты резонансного увеличения энергии электронов, что позволило бы создать принципиально новую методику диагностики ионосферной плазмы [Ткачев, 1979].

Экспериментальные исследования взаимодействия мощных радиоволн выполненные на ИРНР

Иркутский радар некогерентного рассеяния способен создать похожее смешение двух пучков электромагнитного излучения в ионосферной плазме для метрового диапазона длин волн. Предыдущие ис-

следования, проводившиеся в этой области на ИРНР [Потехин, 2008] указывают на существование нелинейного механизма взаимодействия для радиоволн метрового диапазона. На протяжении 2009–2013 гг. на ИРНР была проведена серия экспериментов по наблюдению нелинейного взаимодействия мощных радиоволн. Эксперименты выполнялись по схеме рис. 1. Уникальная конструкция антенной системы ИРНР позволяет сформировать узкую диаграмму направленности, в которой будет смешано излучение на двух различных частотах, разность этих частот в проводившихся экспериментах подбиралась близкой к критической частоте ионосферы в момент проведения наблюдений, для того чтобы максимизировать интенсивность предполагаемых эффектов. Поскольку критическая частота соответствует максимуму электронной концентрации и это означает, что взаимодействие электромагнитного поля с плазмой в этом случае ожидается максимально эффективным.

Наблюдения эффектов выполнялись как при помощи диагностических средств ИРНР, так и при помощи других радиофизических и оптических научных установок. Результаты одного сеанса наблюдений приведены на рис. 2.

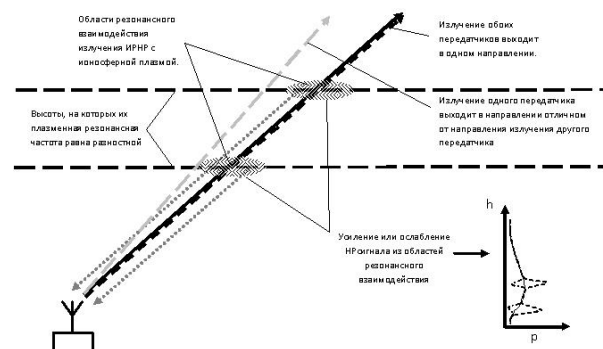


Рис. 1. Поведение рассеянного сигнала в областях взаимодействия двухчастотного излучения ИРНР с ионосферной плазмой.

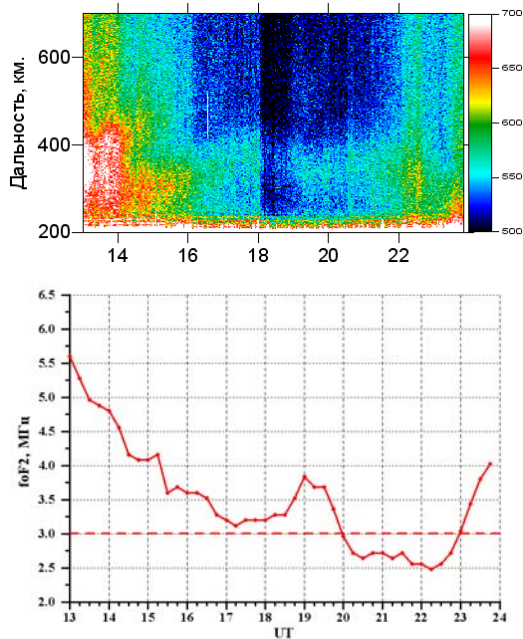


Рис. 2. Сверху запись временной последовательности профилей мощности регистрируемых ИРНР. Цветом обозначен уровень мощности сигнала в относительных единицах. Снизу поведение критической частоты по данным ионозонды, пунктиром обозначена разностная частота УКВ радиоизлучения ИРНР.

Отчетливо наблюдается провал в мощности принимаемого ионосферного сигнала с 10.5 до 11 UT, в то время как шумовой сигнал вдоль развертки остается неизменным. Одной из возможных интерпретаций этого эффекта является усиление поглощения мощности УКВ радиосигналов в ионосфере за счет развития Ленгмюровской неустойчивости.

Результаты другого эксперимента (рис. 3), в котором происходило быстрое переключение режимов работы между обычным и режимом смешения радиоволн, говорят о том, что ионосферный сигнал в области смешения радиоволн усиливается. Причем усиление сигнала происходит существенно выше положения максимума концентрации. Поведение ионосферного сигнала в период времени, когда критическая частота ионосферы приближается к разностной частоте УКВ радиоизлучения ИРНР, не изменяется для обоих режимов работы.

Подобная неоднозначность при проведении исследований при помощи средств наблюдения ИРНР требует дополнительных вспомогательных средств наблюдения для дальнейших исследований. Сложность в осуществлении настройки передающей аппаратуры ИРНР и синхронизации существующих (сеть GPS станций, ионозонды вертикального и наклонного зондирования, оптические инструменты) удаленных на расстояния порядка ста километров устройств, не позволяет выполнить необходимые наблюдения. Поскольку для быстрого переключения режимов работы ИРНР необходимо устройство, синхронизирующее его компоненты, то это же устройство должно управлять и сторонним средством наблюдения. Создать линию синхронизации длиной порядка ста километров достаточно затруднительно и

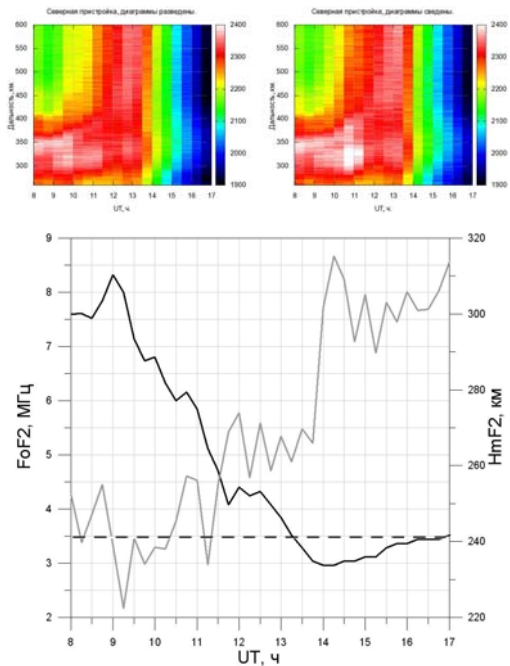


Рис. 3. Сверху запись временной последовательности профилей мощности регистрируемых ИРНР, на левой панели ИРНР работает в обычном режиме, на правой – в режиме смешивания радиоволн. Цветом обозначен уровень мощности сигнала в относительных единицах. Снизу поведение критической частоты (черным) и максимума электронной концентрации (серым) во время проведения эксперимента. Пунктиром обозначена разностная частота УКВ радиоизлучения ИРНР.

к тому же не все установки имеют возможность осуществления синхронной работы с неким удаленным партнером, поэтому наиболее приемлемым вариантом будет являться создание отдельного устройства регистрации (фотометра, радиометра и т. п.) интегрированного в рабочие системы ИРНР.

Оптические наблюдения нелинейных явлений вызываемых мощными радиоволнами в ионосфере ведутся достаточно давно [Гуревич, 2007]. Современные фотометрические системы позволяют наблюдать слабые световые потоки, подсчитывая отдельные фотоны [Mineo, 2003], в настоящее время не составляет трудности собрать подобное устройство, и использовать в дальнейших исследованиях на ИРНР.

Макет фотометра и исследование некоторых ключевых параметров необходимых для дальнейшего создания фотометрической системы.

Для оценки некоторых ключевых моментов определяющих работу фотометра был подготовлен макетный вариант устройства (рис. 4) со вспомогательными элементами для определения ключевых параметров. В установке используется фотоэлектронный умножитель, работающий в режиме счета фотонов, (ФЭУ) «ФЭУ 84». Питание для ФЭУ осуществляет преобразователь напряжения на основе схемы Кокрофта – Уолтона. Одноэлектронный сигнал ФЭУ усиливается в двухкаскадном операционном усилителе. Формирование цифрового импульса заданной амплитуды для дальнейшей обработки одноэлектронного сигнала осуществляет быстрый компаратор. Цифровой сигнал с выхода компаратора поступает на счетчик импульсов (частотомер). Для исслед-



Рис. 4. Блок – схема установки фотометра.

дования поведения измерительной системы при различных уровнях засветки в установке был предусмотрен светоизлучающий диод (~600 нм) запитанный от источника постоянного тока.

Динамический диапазон фотоэлектронного умножителя, работающего в режиме счета фотонов, определяется частотой следования одноэлектронных импульсов для разных уровней засветки. Были проведены измерения частоты следования импульсов компаратора при различном токе через светодиод и уровнях аттенюации светового сигнала. Результаты приведены на графиках рис. 5. Из работы [Гуревич, 2007] использованы данные по свечению возмущенной ионосферы, для того чтобы определить работоспособность измерительной системы во время эксперимента. Яркость свечения дана в рэлях, для оценки требуется перевести эту величину в количество фотонов:

$$1 \text{ Рл} = 10^6 \frac{\text{фотон}}{\text{см}^2 \times \text{с}} = 7.7 \cdot 10^4 \frac{\text{фотон}}{\text{см}^2 \times \text{с} \times \text{ср}} \quad (1.1)$$

Линейный участок с наклоном на графике показывает динамический диапазон измерительной системы. Он начинается от $F=500$ кГц и заканчивается на $F_1=4500$ кГц, после происходит насыщение характеристики. Оценочные значения частоты импульсов ФЭУ, рассчитанные с учетом предполагаемых размеров фотометра, данных об интенсивности излучения ночного неба [Будник, 2008] и свечения возмущенной ионосферы, попадают внутрь динамического диапазона. Максимальная яркость свечения, которую можно детектировать составляет 500 Рл.

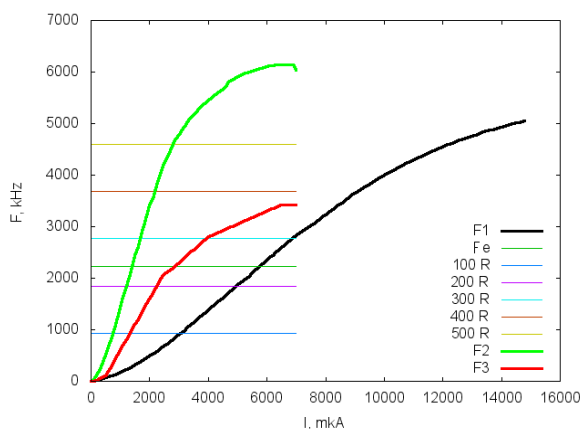


Рис. 5. Оценочное значение частоты следования одноэлектронных импульсов ФЭУ для ночного неба в полученном динамическом диапазоне, F1 – закрытый светодиод, F2 – открытый светодиод, F3 – Ne, F4 – пример, (100 R–500 R) – яркость свечения возмущенной ионосферы.

Другой важной характеристикой измерительной системы является пороговая чувствительность. При слабом освещении фотокатода на выходе ФЭУ появится полезный сигнал в виде одноэлектронных импульсов, идущих с некоторой частотой, среднее значение которой можно измерить, например, при помощи частотомера. Средняя частота следования одноэлектронных импульсов зависит от уровня засветки. Величина этого сигнала подвержена случайным флуктуациям. Флуктуации связаны с тем, что интервалы времени между одноэлектронными импульсами ФЭУ являются случайной величиной, распределенной по закону Пуассона:

$$P(n, F_e \tau) = \left(\frac{F_e \tau^n}{n!} \right) e^{-F_e \tau}, \quad (1.2)$$

который при больших значениях $F_e \tau$ переходит в закон нормального распределения с дисперсией равной среднему значению $F_e \tau$. Среднеквадратичное отклонение некоторого количества одноэлектронных импульсов, пришедших за определенное время, можно определить в этом случае как:

$$\sigma = \sqrt{F_e \tau}; \quad (1.3)$$

Эту величину можно также использовать как меру оценки флуктуаций сигнала, и тогда, флуктуацию средней частоты следования одноэлектронных импульсов можно определить как:

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{F_e}{\tau}} \quad (1.4)$$

Относительная погрешность измерения средней частоты следования одноэлектронных импульсов определяется как:

$$\frac{\sigma \tau}{F_e} = \sqrt{\frac{\tau}{F_e}} \quad (1.5)$$

Для частоты импульсов $F_e \tau = 2.22 \cdot 10^6 \frac{\text{фотоэлектрон}}{\text{с}}$, рассчитанной с учетом предполагаемых размеров фотометра и данных об интенсивности излучения ночного неба [Будник, 2008], среднеквадратичная флуктуация сигнала будет равна $\sigma F_e \tau = \pm 1.49 \cdot 10^3 \frac{\text{фотоэлектрон}}{\text{с}}$.

Используя величину оптического свечения возмущенной ионосферы [Гуревич, 2007] можно посчитать частоту импульсов и чувствительность на уровнях 3σ , 5σ , для разных уровней засветки.

Для уровня σ и засветки от 100 до 500 Рл чувствительность изменяется от 0.10 до 0.23 Рл, для уровня 3σ от 0.31 до 0.69 Рл и для 5σ от 0.51 до 1.15 Рл. Для засветки в 100 Рл и флуктуациях частоты σ минимальный регистрируемый уровень интенсивности составит 100 ± 0.10 Рл, для 200 Рл – 200 ± 0.15 Рл, для 300 Рл – 300 ± 0.18 Рл, для 400 Рл – 400 ± 0.21 Рл и для 500 Рл – 500 ± 0.23 Рл.

При измерении времени выхода на устойчивый режим работы измерительной системы было установлено, что время зависит от поведения температуры внутри контейнера (рис. 6). По всей видимости, наибо-

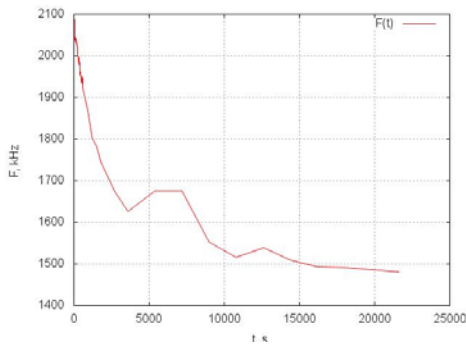


Рис. 6. Стабилизация частоты 6 ч (слева), Изменение температуры (справа).

лее сильным температурным вариациям подвержено напряжение на выходах источника высоковольтного питания ФЭУ. С увеличением температуры происходит уменьшение напряжения питания, что изменяет коэффициент усиления ФЭУ, понижая эффективность регистрации фотонов. При улучшении термостабилизации системы, выход на устойчивый режим работы происходит быстрее.

Выводы

Проведено исследование ключевых параметров фотометра, выдан ряд рекомендаций для модернизации установки.

Оценочные значения частоты импульсов ФЭУ при засветке от искусственно возмущенной ионосферы попадают в середину динамического диапазона измерительной системы. Значит, следуя из теоретической оценки, реализованная измерительная система может детектировать излучение искусственно возмущенной ионосферы, вплоть до 500 Рл.

Проведена оценка чувствительности фотометра для значений σ , 3σ , 5σ для разных уровней засветки. Для засветки в 100 Рл и флуктуациях частоты σ минимальный регистрируемый уровень интенсивности составит 100 ± 0.10 Рл, для 200 Рл– 200 ± 0.15 Рл, для 300 ± 0.18 Рл, для 400 Рл– 400 ± 0.21 Рл и для 500 Рл– 500 ± 0.23 Рл.

Определена основная причина температурной зависимости показаний измерительной системы, это снижение напряжения питания ФЭУ в результате нагрева блока высоковольтного питания ФЭУ. При помощи вентиляции блока питания ФЭУ удалось добиться выхода на устойчивый режим работы измерительной системы в течение 3–3.5 ч. При улучшении термостабилизации системы, время выхода на устойчивый режим уменьшится.

Для улучшения термостабилизации требуется поместить установку в металлический контейнер и обеспечить вентиляцию блока питания ФЭУ. Также требуется создать усовершенствованную систему для проведения более точных измерений. В этой системе ФЭУ с усилительным каскадом будут располагаться в светоизолированной части металлического контейнера (рис. 7) и с помощью коаксиального кабеля подключаться к компаратору и одновибратору, которые будут располагаться в другой части контейнера. Одновибратор нужен для того, чтобы всем одноэлектронным импульсам, идущим с выхода компаратора, сделать одну определенную длительность. Также необходимо сделать дополнительные выходы: на мони-



Рис. 7. Блок – схема модернизированной установки.

тор, выход для регулеровки порогового напряжения компаратора, выход для измерения смещения компаратора, выход с одновибратора для регулировки длительности импульса. После этого сигнал идет на плату SK-LPC2478-S3E, на которой будет реализован счетчик импульсов и схема совпадений. На плате есть возможность подключения к персональному компьютеру. В установке будут использоваться два фотоумножителя. Это будет сделано для отделения полезного сигнала от шумов. Использование двух фотоумножителей поможет улучшить чувствительность установки.

Следует отметить, что теоретические выкладки в этой работе являются оценочными. Для проверки предположений и окончательной доводки фото-метра необходимо провести полевые измерения (в условиях реальной засетки ночного неба) созданного макета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Будник А.П., Лунев В.П. Свечение ночного неба // Препринт ФЭИ– 3139. Обнинск. 2008. 61 с.
- Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи Физических Наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177.
- Потехин А.П., Медведев А.В., Заворин А.В. и др. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния // Космические исследования. 2008. Т. 46, № 4. С. 356–362.
- Ткачев Г.Н., Вергасов А.А., Карлов В.Д. О нелинейных эффектах в ионосфере, обусловленных действием магнитного поля двух высокочастотных импульсов // Геомагнетизм и аэрономия. 1979. Т. 19, № 6. С. 1108–1109.
- Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликов В.В. и др. Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением // Успехи Физических Наук. 2007. Т. 177, № 3. С. 330–340.
- Norman M. Kroll, Amiram Ron, Norman Rostoker. Optical mixing as a plasma density probe // Phys. Rev. Lett. 1964. V. 13, n 3. P. 83–86.
- Stansfield B.L., Nodwell R., Meyer J. Enhanced scattering of laser light by optical mixing in a plasma // Phys. Rev. Lett. 1971. V. 26, n 20. P. 1219–1221.
- Guy Weyl. Optical mixing in a magnetoactive plasma // The Physics of Fluids. 1970. V. 13, n 7. P. 1802–1811.
- Dysthe K.B., Mjølhus E., Trulsen J. Nonlinear mixing as a plasma density probe // J. Geophysical Research. 1978. V. 83, n A5. P. 1985–1990.
- Lavergnat J., Bauer P., Delahare J.Y., Ney R. Non linear sounding of the ionospheric plasma // Geophysical Research Letters. 1977. V. 4, n 10. P. 417–419.
- Mineo T., Catalano O., Agnetta G., et al. Measurements of Diffuse Night Sky Background // 28th International Cosmic Ray Conference. July 31–August 7. 2003. P. 833–836.

Институт Солнечно-Земной физики СО РАН, Иркутск, Россия