

УДК 510.535: 537.531: 629.783

Определение основных характеристик стенда НААРР, подлежащих мониторингу со спутника

Мурлага А.Р.

Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт имени академика А.И. Берга, ул. Новая Басманная, 20, Москва, 105066, Россия

e-mail: myrlaga_olga@mail.ru

Аннотация

Рассматриваются вопросы контроля за воздействием на ионосферу мощного электромагнитного излучения, вырабатываемого наземными нагревными стендами. Предлагается построение спутниковой системы для мониторинга стенда НААРР как самого мощного и технически оснащенного из них. Поставлена задача мониторинга. Проанализированы основные характеристики стенда НААРР. Отобраны наиболее значимые характеристики стенда НААРР для мониторинга со спутника.

Ключевые слова: ионосфера, стенды нагрева ионосферы, НААРР, спутниковая система мониторинга, природные антенны СНЧ/ОНЧ волн

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется вопросу построения спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), решающих широкий спектр научных и прикладных задач. Так, разрабатываются системы мониторинга параметра солёности поверхностных вод Мирового океана и степени влажности почвогрунтов суши [1], системы обнаружения и анализа работы

радиолокационных станций из космоса [2], системы обнаружения движения крупных косяков рыбы, залежей полезных ископаемых и т.д.

Отдельным важным сегментом спутниковых систем ДЗЗ является мониторинг состояния ионосферной плазмы, причём в последние годы особенно актуальным становится не только контроль за естественными изменениями, происходящими в ионосфере (суточные, сезонные, годовые вариации), но и за изменениями искусственными. Обусловлено это, в частности, следующим обстоятельством.

В 70-х годах XX века в связи с необходимостью организации устойчивых каналов связи с погружёнными объектами [3, 4] была разработана оригинальная техника использования ионосферы для генерации сверхнизких (СНЧ) ($f=3...3000$ Гц) и очень низких частот (ОНЧ) ($f=3...30$ кГц) [5]. Способ заключается в облучении ионосферы мощным источником высокочастотного (ВЧ) излучения, модулированного по амплитуде. При этом на частоте модуляции возникает вторичное излучение, объясняемое нелинейным детектированием модулированных ВЧ сигналов ионосферой [6]. Для реализации упомянутого способа требуется мощный (~ 100 МВт) передатчик, располагающийся на земле и получивший название нагревного стенда. В ходе проведения работ по генерации ОНЧ и СНЧ таким способом было выявлено, что наиболее эффективно располагать передатчик в высоких широтах, поскольку здесь в ионосфере протекают большие природные токи, называемые «полярной электроструей» (polar electrojet) [7]. В присутствии тока полярной электроструи периодический нагрев электронов в нижней ионосфере уменьшает проводимость нагретого пятна, которое играет роль горизонтального электрического диполя на частоте модуляции [8]. Образованный таким образом

диполь, в свою очередь, запитывает волновод земля-ионосфера, реализуя концепцию сверхдальней связи (в т.ч. с погруженными объектами) и локации.

Самым мощным и технически оснащённым из наземных нагревных стендов (и расположенными к тому же в области полярной электроструи) является стенд НААРР¹(62°23'с.ш., 145°08'з.д.), имеющий следующие параметры:

- излучающий массив – 180-элементная (прямоугольник 12×15) фазированная антенная решётка (ФАР);
- максимальная излучаемая мощность – 3,6 МВт;
- рабочий диапазон частот – 2,8 – 10 МГц;
- коэффициент усиления (КУ) антенного массива – до 31 дБ;
- ширина луча диаграммы направленности ФАР – 4,5° – 15°.

С использованием перечисленных характеристик излучающего массива стенда НААРР становится возможным решение целого ряда прикладных задач двойного назначения. Его первичное излучение позволяет осуществлять локацию (в т.ч. надионосферную) на больших расстояниях, что обусловлено значительной эффективной излучаемой мощностью. Вторичное же излучение (излучение созданного в ионосфере диполя) можно использовать для сверхдальней связи, локации в волноводе земля-ионосфера, связи с погружёнными объектами, а также для дистанционного зондирования удалённых территорий. И это далеко не полный перечень возможностей станции.

¹ **НААРР** – High Frequency Active Auroral Research Program (Программа Высокочастотных Активных Авроральных Исследований)

В связи с тем, что финансирование работ, проводимых по программе HAARP, проводится военными службами и ведомствами США [9-11], результаты таких исследований закрыты. Как следствие, важно создать систему спутникового мониторинга с целью постоянного получения объективной информации о деятельности стенда HAARP (принципы построения такой системы изложены в [12], где сформулирован ряд критериев для создания орбитальной группировки спутников и описаны методы расчета по критериям).

Следует отметить, что ранее в ряде работ [13, 14] были предложены конструктивные решения проблемы спутникового мониторинга изменений в ионосфере и магнитосфере, вызванных мощными передатчиками с поверхности Земли. Однако в упомянутых работах решалась прямая задача мониторинга, заключающаяся в следующем:

- момент включения наземной станции известен априори;
- параметры передаваемого сигнала известны априори;
- наблюдение проводится одним спутником;
- параметры орбиты спутника и состав бортовой аппаратуры подбираются на основании упомянутых ранее известных априорных данных;
- спутниковые исследования носят поисковый характер (проводится набор статистики, не предъявляются требования к непрерывности наблюдения, параметры изучаемых с Земли сигналов могут быть повторены сколь угодно много раз).

В нашем случае задача мониторинга является обратной и ставится принципиально по-другому. Есть станция (стенд НААРР), сигналы которой необходимо пеленговать со спутника. Станция стационарна, её местоположение известно. При этом момент выхода в эфир станции и периодичность включений априори неизвестны. Каждый очередной сеанс работы станции может кардинально отличаться от предыдущего, что не позволяет прибегнуть к набору статистики и решить задачу мониторинга с использованием одного единственного спутника. Напротив, это приводит к необходимости вести по возможности непрерывный мониторинг станции, поскольку поставляемая ей информация в каждый момент времени потенциально уникальна. Таким образом задача мониторинга в нашем случае сводится к нахождению оптимального значения функции $\Psi(m, I, F, t)$. Здесь m – число спутников в орбитальной группировке, I – количество информации, получаемой от станции, F – величина финансовых затрат, необходимых для развёртывания орбитальной группировки, t – время, требующееся для развёртывания орбитальной группировки, Ψ – модельная функция орбитальной группировки, включающая в себя заданные орбиты для мониторинга, расположение спутников на орбитах и состав бортовой аппаратуры для мониторинга. Под оптимальным значением модельной функции Ψ понимается такое её значение, при котором m , F и t минимальны, а I максимально.

Общее рассмотрение всех входящих в модельную функцию Ψ параметров выходит за рамки настоящей статьи ввиду объёмности исследования, поэтому ограничимся анализом только параметра I .

Интуитивно понятно, что от того, как определить параметр I , будет очень сильно зависеть функция Ψ . В [15] при постановке задачи эта величина задавалась как совокупность следующих позиций:

1. Периодичность включения станции.
2. Параметры излучаемых станцией сигналов:
 - несущая частота;
 - вид поляризации излучения;
 - тип модуляции сигнала;
 - частота модуляции.
3. Отклонение главного лепестка диаграммы направленности антенной системы от нормали.

В рамках настоящей статьи из перечисленных выше пунктов выделим наиболее существенные (с точки зрения максимальной информативности). Это целесообразно сделать на основании следующего соображения. Рассмотрим в качестве иллюстрации, к чему приведёт регистрация всего лишь двух составляющих информационного параметра I из шести: несущей частоты станции и частоты модуляции излучаемого станцией сигнала. Как было сказано ранее, несущая частота станда HAARP составляет 2,8 – 10 МГц. При этом частота модуляции сигнала лежит в диапазоне 0 – 30 кГц. Построение спутниковой системы, способной регистрировать как несущую частоту, так и частоту модуляции потребует бортового комплекса, работающего одновременно:

- в коротковолновом (КВ) диапазоне 2,8 – 10 МГц;

- в сверхдлинноволновом (СДВ) диапазоне 10 – 20 кГц;
- в области сверхнизких частот (СНЧ) 0,1 – 10 000 Гц.

Последние два дефиса отвечают за регистрацию вторичного излучения ионосферы, определяемого частотой модуляции несущей сигнала, вырабатываемого стендом HAARP.

В диапазоне до 10,0 МГц в отличие от более высокочастотных диапазонов диаграммы направленности антенн РЭС либо слабо направленные, либо практически круговые. При этом имеется огромный разброс излучаемых мощностей РЭС, что, во-первых, требует применения достаточно узкой полосы приёма (порядка сотен Гц) и, во-вторых, большого динамического диапазона приёмного устройства (не менее 100 ÷ 110 дБ). При использовании цифровой обработки сигналов указанные обстоятельства однозначно требуют применения 16-и разрядных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), и необходимости вести приём сигналов радиоэлектронных средств (РЭС) в этом диапазоне на заранее известных частотах, а селектирование сигналов стенда HAARP осуществлять целенаправленно по принимаемой мощности и путем бланкирования приёмов на известных частотах мешающих РЭС.

В составе бортового комплекса целесообразно иметь супергетеродинный приемник с высокой промежуточной частотой в 100 – 120 МГц.

При применении цифровой обработки сигналов на промежуточной частоте 100 МГц с полосой 10 МГц разделение сигналов производится после оцифровки всей полосы на АЦП с помощью цифровых фильтров на мощных программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Указанные выше устройства могут быть

выполнены конструктивно более компактными, чем аналогичные по функциям аналоговые устройства.

При проектировании современных супергетеродинных приёмных устройств большое внимание следует уделить гетеродинным устройствам. Они должны обладать следующими наиболее важными параметрами:

- высокой стабильностью и точностью установки генерируемой частоты – лучше, чем 10^{-6} ;
- иметь небольшие амплитудные и фазовые шумы;
- минимальное время перестройки.

В диапазоне 2,8 – 10 МГц в гетеродинном устройстве целесообразно использовать принцип DDS (непосредственный синтез частоты), что отвечает всем поставленным выше вопросам и, кроме того, имеет небольшие конструктивные размеры и массу.

Для КВ диапазона 2,8–10 МГц предлагается использовать двухкомпонентную ферромагнитную антенну, которая позволяет отстроиться «нулем» диаграммы направленности (ДН) в азимутальной плоскости от мешающих РЭС.

СДВ диапазон 10,0–20,0 кГц потребует применения индукционного магнитоприемника (ИМ) с отрицательной обратной связью по магнитному полю, что позволит обеспечить высокий динамический диапазон и стабильность характеристик.

Задачу в СНЧ и СДВ диапазонах можно решить при помощи трехкомпонентного измерителя параметров электрического и магнитного полей ВЕ-МЕТР-АТ-003, позволяющего одновременно измерять полные вектора

электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля (ЭМП) в двух полосах частот: от 5 Гц до 2 кГц и от 2 кГц до 400 кГц. Трехкомпонентные датчики электрического и магнитного поля, используемые в приборе, дают возможность непосредственного измерения полного вектора ЭМП без подбора ориентации измерительной антенны.

Описанные аппаратные решения в совокупности удорожают стоимость системы спутникового мониторинга стенда HAARP, ухудшают массогабаритные характеристики, повышают время, требующееся для развёртывания такой системы. Поэтому вернёмся к анализу составляющих информационного параметра I и отберем лишь самые важные его компоненты, что позволит оптимизировать модельную функцию Ψ .

Первой составляющей параметра I является периодичность включения станции. Очевидно, что при условии регистрации любого параметра сигнала стенда HAARP одновременно будет зарегистрирован и факт включения станции. Непрерывный или квазинепрерывный мониторинг станции даст совокупность фактов её включения, что и составит периодичность. Таким образом информация о периодичности включения станции появляется автоматически при условии регистрации какого-то одного (любого) параметра излучаемого станцией сигнала, в то время как получение информации о периодичности включения станции само по себе не влияет ни на состав орбитальной группировки, ни на тип орбит, ни на состав бортовой аппаратуры.

Далее переходим к анализу параметров излучаемых станцией сигналов. Первой в списке значится несущая частота. Как отмечено в [12, 16], несущая частота

сигнала будет влиять на высоту его отражения от ионосферы, т.е. непосредственно на то, с какой областью ионосферной плазмы в данный момент происходит работа (с целью последующей генерации СНЧ/ОНЧ волн). Никакой другой информационной составляющей несущая частота не несёт. Для целей спутникового мониторинга станции не столь важно, на какой высоте над поверхностью Земли будет создан излучающий диполь, гораздо важнее его свойства. Поэтому от регистрации несущей частоты излучаемого станцией НААРП сигнала можно отказаться.

Следующим параметром излучаемого станцией сигнала является вид его поляризации (на стенде НААРП реализовано три вида поляризации сигнала: левая круговая, правая круговая и линейная). Как утверждается в [17], левая круговая поляризация не распространяется в ионизированной среде, в то время как правая круговая поляризация распространяется без потерь. Линейная поляризация, в свою очередь, может быть представлена как суперпозиция левой круговой и правой круговой поляризаций. Таким образом вид поляризации сигнала влияет исключительно на величину мощности, доставляемой станцией в ионосферу, а значит данный параметр сигнала является чисто техническим, не несёт никакой информационной составляющей и от его регистрации можно отказаться.

Частота модуляции сигнала является главным информационным параметром с точки зрения спутникового мониторинга, поскольку именно от неё зависит частота сгенерированного ионосферой СНЧ/ОНЧ сигнала. Ведь, как было сказано выше, в присутствии тока полярной электроструи периодический нагрев электронов в нижней ионосфере уменьшает проводимость нагретого пятна, которое играет роль горизонтального электрического диполя на частоте модуляции.

Отклонение главного лепестка диаграммы направленности антенной системы от нормали, как и периодичность включения станции, само по себе не влияет ни на состав орбитальной группировки, ни на тип орбит, ни на состав бортовой аппаратуры. Данный параметр регистрируется автоматически при условии приёма сигнала станции в секторе углов визирования, отличных от тех, что определяются облучением по нормали. Однако этот параметр важен, поскольку от него зависит, под каким углом к силовым линиям магнитного поля Земли излучение станции входит в ионосферу, а следовательно, зависит и условие формирования ионосферного диполя, влияющее на его характеристики (ориентацию, эффективную излучаемую мощность). Таким образом пренебрегать этим параметром нельзя.

В результате детального анализа составляющих параметра количества информации I , сформулированных в [15], показано, что действительно важными являются только частота модуляции сигнала, периодичность включения станции и отклонение главного лепестка диаграммы направленности антенной системы станции от нормали. При этом последние две составляющие не влияют ни на состав орбитальной группировки, ни на тип орбит, ни на состав бортовой аппаратуры и получаются автоматически при условии регистрации частоты модуляции излучаемого станцией сигнала. Таким образом определённый параметр I позволяет оптимизировать функцию Ψ в части состава бортовой аппаратуры орбитальной группировки, поскольку даёт возможность отказаться от использования в ней аппаратуры, работающей в КВ диапазоне 2,8 – 10 МГц. Это, в свою очередь, снижает стоимость системы спутникового мониторинга стенда HAARP и улучшает её массогабаритные характеристики.

Библиографический список

1. М.В. Данилычев, В.А. Калошин, Б.Г. Кутуза. Спутниковые радиометрические системы L-диапазона// Сборник докладов VII Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: Издание JRE – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2013. – с. 391 – 394.
2. Бодрихин Н.Г., Бондарев Ю.С., Хурматуллин В.В. Средства космического радиолокационного и радиотехнического наблюдения земной поверхности// Сборник докладов VII Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: Издание JRE – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2013. – с. 301 – 307.
3. Мурлага А.Р. Варианты построения спутниковой системы для мониторинга излучения создаваемых стендом HAARP природных антенн СНЧ и ОНЧ волн// Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации работ. – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2013. – с. 194 – 195.
4. Мурлага А.Р. Порядок выбора критерия при построении спутниковой системы для мониторинга излучения создаваемых стендом HAARP природных антенн СНЧ и ОНЧ волн// Сборник докладов VII Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и радиосвязь». – М.: Издание JRE – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2013. – с. 202 – 204.
5. G.G. Getmantsev, N.A. Zuikov, D.S. Kotik, L.F. Mironenko, N.A. Mityakov, V.O. Rapoport, Yu.A. Sazonov, V.Yu. Trakhtengerts, and V.Ya. Eidman, Combination frequencies in the interaction between high-power short-wave radiation and ionospheric plasma, *JETP Lett.*, **20**, 101-102, 1974.
6. D.S. Kotik, and V.Yu. Trakhtengerts, Mechanism of excitation of combination frequencies in ionospheric plasma, *JETP Lett.*, **21**, 51-52, 1975.
7. P. Stubbe, and H. Kopka, Modulation of the polar electrojet by powerful HF waves, *J. Geophys. Res.*, **82**, 2319-2325, 1977.

8. K. Papadopoulos, N.A. Gumerov, X. Shao, I. Doxas, and C.L. Chang, HF-driven currents in the polar ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L12103, doi: 10.1029/2011GL047368, 2011.
9. M.B. Cohen, R.C. Moore, M. Golkowski, and N.G. Lehtinen, ELF/VLF wave generation from the beating of two HF ionospheric heating sources, *J. Geophys. Res.*, **117**, A12310, doi: 10.1029/2012JA018140, 2012.
10. M.B. Cohen, U.S. Inan, D. Piddyachiy, N.G. Lehtinen, and M. Golkowski, Magnetospheric injection of ELF/VLF waves with modulated or steered HF heating of the lower ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **116**, A06308, doi: 10.1029/2010JA016194, 2011.
11. M.B. Cohen, M. Golkowsky, and U.S. Inan, Orientation of the HAARP ELF ionospheric dipole and the auroral electrojet, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L02806, doi: 10.1029/2007GL032424, 2008.
12. А. Мурлага. Основы построения спутниковой системы для мониторинга стенда HAARP// Монография. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 52 с.
13. U.S. Inan and R.A. Helliwell. DE-1 observations of VLF transmitter signals and wave-particle interactions in the magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 917, 1982.
14. M. Platino, U.S. Inan, T.F. Bell, M. Parrot, and E.J. Kennedy, DEMETER observations of ELF waves injected with the HAARP HF transmitter, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L16101, doi:10.1029/2006GL026462, 2006.
15. Гуреев Э.Д., Мурлага А.Р. Варианты построения спутниковой системы для мониторинга стенда HAARP// Труды МАИ, № 65, 2013.
16. Мурлага А.Р. Определение высот орбит спутниковой системы для мониторинга стенда HAARP. Сборник докладов конференции «RLNC 2013». Т. 3. – Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ» ООО, 2013. – с. 1790-1795.
17. R.A. Helliwell. VLF wave stimulation experiments in the magnetosphere from Siple Station, Antarctica, *Rev. Geophys.*, **26**, 551-578, 1988.