

Подавление локальных помех при наблюдениях шумановских резонансов

Б. В. Лазебный, Ю. В. Аристов, В. Е. Пазнухов, А. Г. Рохман

*Радиоастрономический институт НАН Украины
310002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4**Статья поступила в редакцию 10 апреля 1998 г.*

В работе описан метод помехозащищенного приема естественных электромагнитных сигналов в диапазоне частот шумановских резонансов (ШР) 4-40 Гц. Суть метода заключается в корреляционной обработке сигналов от двух разнесенных на расстояние ≥ 50 м разнотипных антенн и получении взаимного спектра.

Экспериментально показано, что при "стандартном" времени усреднения ~ 10 мин предложенный метод позволяет избавиться от помех, обусловленных конструкцией каждой из антенн (например, вибрационной помехи), а также от большей части местных метеопомех (дождь, снег и т. д.). Проведены натурные измерения с применением двух различных вертикальных электрических антенн. Приведены рисунки, которые показывают, что применение метода для времен усреднения 10 минут и 7 часов позволяет подавить низкочастотные помехи на 15-20 дБ. Оценена верхняя частота локальных низкочастотных помех.

У роботі описано метод завадозахищеного прийому природних електромагнітних сигналів у діапазоні частот шуманівських резонансів (ШР) 4-40 Гц. Суть методу полягає у кореляційній обробці сигналів від двох рознесених на відстань ≥ 50 м різнотипових антен та отриманні взаємного спектру.

Експериментально доведено, що при "стандартному" часі усереднення ~ 10 хвилин, запропонований метод дозволяє позбутися завад, обумовлених конструкцією кожної антени (наприклад, вібраційної завади та ін.), а також від більшої частини місцевих метеоперешкод (дощ, сніг, та ін.). Проведено натурні виміри із застосуванням двох різних вертикальних електричних антен. Приведено малюнки, які показують, що застосування методу для часу усереднення 10 хвилин та 7 годин дозволяє позбутися низькочастотних завад на 15-20 дБ. Зроблено оцінку верхньої частоти локальних низькочастотних завад.

Сферическая полость, образованная поверхностью Земли и ионосферой, представляет собой своеобразный глобальный резонатор, который возбуждается грозowymi разрядами [1]. Интерес к глобальным резонансам (шумановским резонансам – ШР) в последнее время значительно усилился. Это связано с тем, что параметры ШР несут информацию об изменении температуры в глобальном масштабе [2]. Кроме того, в 1994 г. были обнаружены электрические разряды между грозвым облаком и ионосферой, так называемые "red sprites", которые сопровождаются всплесками СНЧ излучения [3].

Полезным сигналом "резонатора" в диапазоне частот 4-40 Гц (СНЧ) является шумоподобный временной процесс, состоящий из непрерывного фона и всплесков СНЧ излучений [4]. В спектре такого сигнала наблюдаются резонансные максимумы на 8, 14, 20, 26, 32 Гц. Это и есть частоты ШР. При проведении экспериментов в СНЧ диапазоне приходится сталкиваться с обилием помех. Эти помехи, как правило, носят локальный характер и могут быть различного вида и происхождения – как узкополосные, так и импульсные – ши-

рокополосные. Основными источниками узкополосных СНЧ помех являются линии электропередач, телефонные и телеграфные линии связи, вибрации антенн и др. Импульсные СНЧ помехи занимают весь спектр и могут быть порождены совершенно различными источниками: близкими грозами, снегом, дождем, электросваркой, движением электротранспорта и др. [1]. Все перечисленные помехи являются локальными, и их влияние сказывается на спектральных характеристиках ШР, полученных в эксперименте.

При наблюдениях вертикальной электрической компоненты ШР основными методами борьбы с помехами являются:

1. Расположение приемных антенн вдали от источников промышленных помех, в местностях с малой энергонасыщенностью.
2. Применение специальных конструкций электрических антенн.
3. Применение в приемных устройствах следящих режекторных фильтров на частоте электросети.
4. Подавление помех фильтрами низкой и высокой частоты вне полосы анализа.

5. Осуществление синхронного приема в далеко разнесенных пунктах наблюдения с последующим подавлением местных помех.

Ранее авторами был осуществлен синхронный прием в двух далеко разнесенных пунктах наблюдения [5]. Целью этого эксперимента было исследование меры когерентности и фазовых соотношений в диапазоне частот ШПР. Проведенная корреляционная обработка позволила избавиться от локальных помех. Этот результат основывается на очевидной предположении, что радиус пространственной корреляции для сигналов "резонатора" r_R больше расстояния между пунктами наблюдения ($r_R > l$), а местные помехи полностью декоррелированы при $l \sim 5000$ км. В результате корреляционной обработки сигналов, принятых однотипными приемными антеннами и устройствами, вычислялся взаимный спектр $S_{1,2}(\omega)$, модуль которого содержит информацию о резонансных частотах f_n и добротностях Q_n шумановского резонатора [3]. Однако при большом расстоянии ($l \sim 5000$ км) уже следует учитывать то обстоятельство, что в каждом пункте спектры ШПР могут отличаться друг от друга, так как спектр каждого принятого сигнала зависит от местоположения источника, а во взаимном спектре эта зависимость будет более сложной, что может исказить данные о f_n и Q_n .

В настоящей работе предлагается метод борьбы с местными помехами, основанный на корреляционной обработке и вычислении взаимных спектров двух сигналов, принятых от электрических антенн, разнесенных на сравнительно небольшое расстояние ($l \geq 50$ м). Важно, чтобы конструктивное исполнение антенн было разным. Это условие – разнотипность – позволяет избавиться от помех, связанных с особенностями конструкции каждой отдельной антенны (вибрации и т. д.). Второе обстоятельство – сравнительно небольшое расстояние между антеннами – позволяет избавиться от большинства низкочастотных помех, связанных с метеоусловиями (дождь, снег, ветер). Эти помехи в СНЧ диапазоне, среди естественных, являются наиболее мощными и для проведенного эксперимента сосредоточены в области 4÷20 Гц. Эксперимент показал, что упомянутые метеопомехи в значительной степени декоррелированы уже на расстояниях порядка 30÷40 метров.

Пусть на выходе каждой антенны кроме резонансных сигналов $U(r_i, \omega)$ присутствуют локальные помехи $n(r_i, \omega)$, r_i – радиус-вектор i -го пункта наблюдения. Тогда суммарный сигнал имеет вид

$$U(r, \omega) = U(r_i, \omega) + n(r_i, \omega), \quad i = 1, 2.$$

Если пространственный разнос ($r_1 - r_2$) больше радиуса корреляции помех, но меньше длины волны регистрируемых колебаний, то

$$\begin{aligned} |S_{1,2}(\omega)| &= \left| \left\langle [U(r_1, \omega) + n(r_1, \omega)] [U(r_2, \omega) + n(r_2, \omega)]^* \right\rangle \right| = \\ &= \left| \left\langle U(r_1, \omega) U^*(r_2, \omega) \right\rangle \right|, \end{aligned} \quad (1)$$

при этом:

$$K_{1,2}(\omega) = \frac{|S_{1,2}(\omega)|}{\|S_1(\omega)\| \|S_2(\omega)\|^{1/2}}, \quad (2)$$

где $K_{1,2}(\omega)$ – коэффициент взаимной корреляции спектров, $|S_{1,2}(\omega)|$, $|S_1(\omega)|$, $|S_2(\omega)|$ – модули взаимного и энергетических спектров с антенн А1 и А2.

В то же время энергетические спектры сигналов, принятых каждой из антенн, имеют вид

$$S_i(\omega) = \left\langle |U(r_i, \omega)|^2 \right\rangle + \left\langle |n(r_i, \omega)|^2 \right\rangle. \quad (3)$$

Сравнивая формулы (1) и (3), можно видеть, что различие в радиусах корреляции позволяет избавиться от локальных помех.

Был проведен натурный эксперимент с использованием двух вертикальных электрических антенн. Первая электрическая антенна (А1) представляла собой металлический шар диаметром ~ 1 м, поднятый на мачте на высоту 12 м. Вторая электрическая антенна была выполнена в виде горизонтального провода диаметром ~ 0,5 мм, длиной ~ 50 м. Приемные каналы были идентичны, каждый из них состоял из антенного усилителя (АУ), фильтров верхних и нижних частот (ФВЧ, ФНЧ) и режекторов помех 50 Гц. Частотная характеристика одного из каналов, а также разностно-фазовая характеристика приведены на рис. 1. Обработка проводилась на ПЭВМ типа IBM 486 с временами усреднения 10 мин и 7 часов.

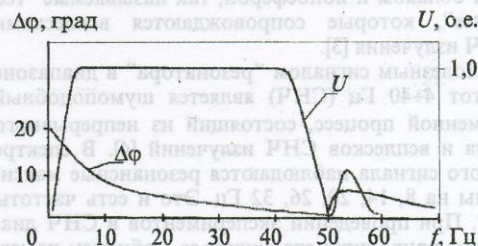


Рис. 1. Частотная характеристика $U(f)$ одного из каналов и разностно-фазовая зависимость $\Delta\phi(f)$ обоих каналов

На рис. 2, 3 приведены результаты полевых измерений. Рис. 2, а, б иллюстрируют прием антенной А1 (спектр а) и антенной А2 (спектр б), рис. 2, в – модуль взаимного спектра с временем накопления 10 мин. Видно, что во взаимном спектре отчетливо различимы четыре шумановских мода, в то время как индивидуальные спектры (рис. 2, а, б) сильно искажены помехами (во время проведения эксперимента был ветер средней силы и слабый дождь). На рис. 3 приведены данные, соответствующие времени усреднения 7 часов (рис. 3, а, б – спектры с А1, А2, рис. 3, в – взаимный спектр). Величина подавления низкочастотной помехи составила 15÷20 дБ.

На рис. 2, г и рис. 3, г приведены графики рассчитанного коэффициента взаимной корреляции, из которых следует, что низкочастотные помехи в основном сосредоточены в диапазоне 4÷20 Гц (в этой полосе частот значение коэффициента взаимной корреляции между сигналами с антенн А1 и А2 уменьшается).

В заключение отметим:

– Предложенный метод борьбы с локальными помехами позволяет достаточно эффективно ослабить два вида низкочастотных помех. Это вибрационные и метеопомехи, сосредоточенные, как показали измерения, в диапазоне частот от 4 до 20 Гц. Следует подчеркнуть, что вибрации влияют на качество приема как электрической, так и магнитной компонент ШР. Второй тип помех в основном присутствует на выходе электрической антенны и связан с перемещением аэрозолей, заряженных частиц и областей пространственного заряда.

– Метод эффективно использовался для обработки реализаций различных длительностей: от десятков секунд до нескольких часов.

– Проведенная обработка (см. рис. 2, г; 3, г) дала возможность оценить верхнюю границу низкочастотных помех, которая в данном эксперименте составила ~ 20 Гц.

Предложенный метод применим при отсутствии нелинейных искажений сигнала в приемном тракте.

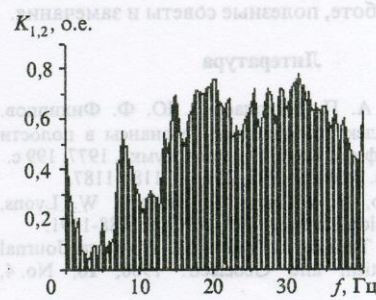
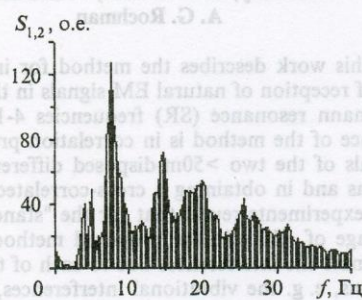
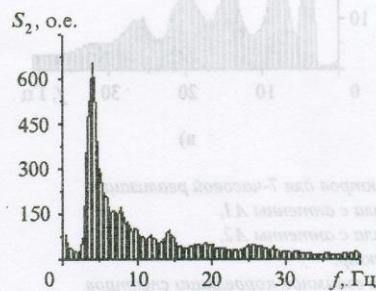
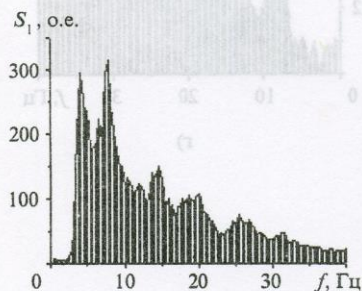


Рис. 2. Виды спектров для 10-минутной реализации:
а – спектр сигнала с антенны А1,
б – спектр сигнала с антенны А2,
в – взаимный спектр,
г – коэффициент взаимной корреляции спектров

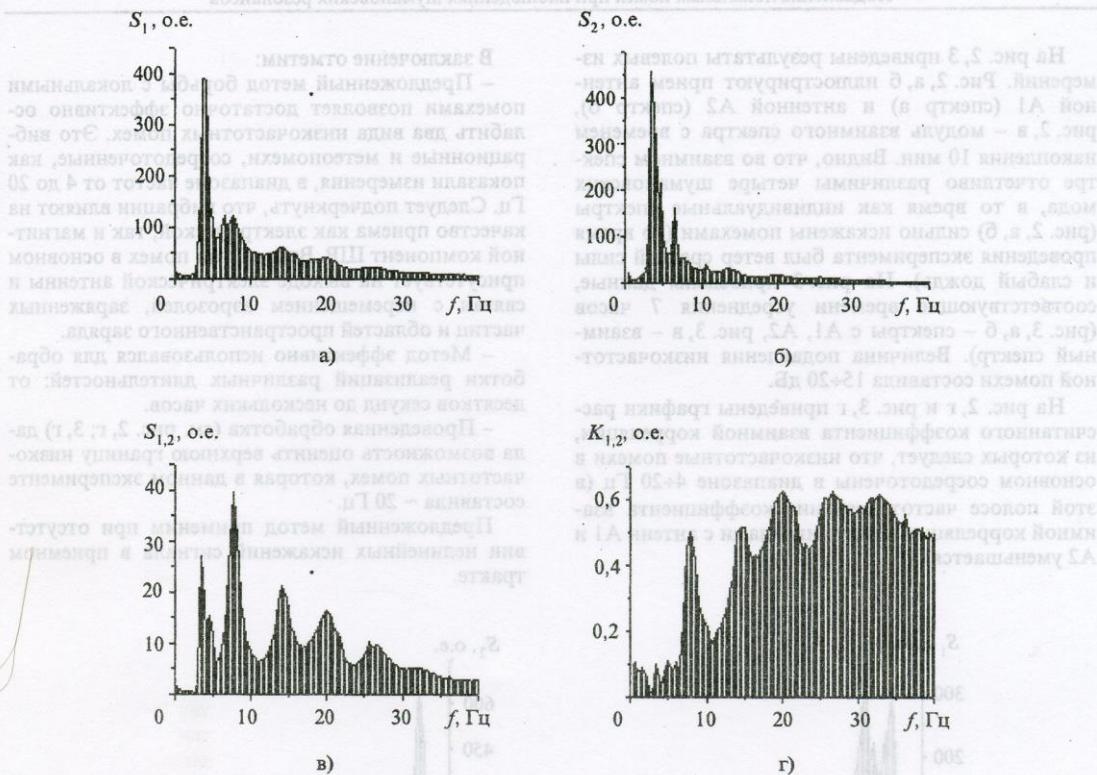


Рис. 3. Виды спектров для 7-часовой реализации:
 а – спектр сигнала с антенны А1,
 б – спектр сигнала с антенны А2,
 в – взаимный спектр,
 г – коэффициент взаимной корреляции спектров

Авторы благодарны В. С. Белею за программы обработки, Ю. М. Ямпольскому за полезные замечания, а также выражают глубокую признательность профессору П. В. Блюху за постоянное внимание к работе, полезные советы и замечания.

Литература

1. П. В. Блюх, А. П. Николаенко, Ю. Ф. Филиппов. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля – ионосфера. Киев, Наукова Думка, 1977, 199 с.
2. E. R. Williams. Science. 1992, **256**, pp. 1184-1187.
3. D. Voccipio, E. Williams, S. Hecman, W. Lyons, I. Baker, R. Boldi. Science. 1995, **269**, pp. 1088-1091.
4. T. Ogawa, Y. Tanaka, T. Miura, M. Yasykara. Journal of Geomagnetism and Geoelectr. 1966, **18**, No. 4, pp. 443-454.
5. Б. В. Лазебный, А. П. Николаенко, В. Е. Пазнухов и др. Геомагнетизм и астрономия. 1987, №3, с. 516-518.

Suppression of Local Interferences while Observing Shumann Resonances

B. V. Lazebny, Y. V. Aristov, V. E. Paznukhov, A. G. Rochman

This work describes the method for interference-proof reception of natural EM signals in the range of Shumann resonance (SR) frequencies 4-10 Hz. The essence of the method is in correlation processing of signals of the two >50m-disposed different-type antennas and in obtaining a cross-correlated spectrum. The experiments reveal that for the "standard" time-average of ~10 min the proposed method allows to eliminate the interferences due to each of the antenna designs, e.g. the vibrational interferences, as well as most of the local meteorologic ones (due to rain, snow, etc.). The field measurements were made by employing two different vertical electrical antennas and the shown drawings illustrate the 15-20 dB gain the suggested method yields for the time-averages of 10 min and 7 hrs. The highest frequency for the local LF interferences was also estimated.