
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396.96
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-3-208-212

МУЛЬТИПЛИКАТИВНАЯ ОБРАБОТКА ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

А. Б. АТНАШЕВ, В. Г. ЦЫБРИН

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: atn2@mail.ru*

Рассматриваются вопросы обработки зондирующих электромагнитных сигналов с большой базой на основе трансформации временного масштаба. Показано, что применение указанного метода преобразования сигнала позволяет скомпенсировать временное смещение, а также доплеровский сдвиг частоты сигнала любой структуры и осуществить оптимальную обработку сигнала независимо от скорости сближения с объектом. Этим обеспечивается повышенная помехозащищенность и возможность точного разрешения целей.

Ключевые слова: мультипликативный, аддитивный, корреляционная, трансформация, транспонирование, доплеровский, гетеродинирование

Примером генерации электромагнитных колебаний можно считать излучение источников, находящихся во Вселенной, например звезд. Для удаленных звезд характерно смещение частоты излучения, так называемое „красное смещение“ [1], которое на практике проявляется как сдвиг частоты составляющих спектра влево, в сторону уменьшения частоты. Указанное смещение имеет, по существующему представлению, доплеровскую природу. Количественно красное смещение характеризуется величиной z , определяемой как

$$z = \frac{\lambda_r - \lambda_s}{\lambda_s}, \quad (1)$$

где λ_r, λ_s — длины волн излучения, принимаемого наблюдателем и генерируемого источником соответственно.

Учитывая, что $\lambda = c/f$, где c — скорость распространения излучения, а f — частота излучения, после подстановки указанного соотношения в (1) получаем

$$z = f_s / f_r - 1,$$

где f_r, f_s — частоты излучения, принимаемого наблюдателем и генерируемого источником соответственно.

Частоту излучения, принимаемого наблюдателем, можно представить как

$$f_r = f_s / (z + 1).$$

Очевидно, что величина, получаемая при вычислении выражения $z + 1$, является постоянной для конкретного источника. Следовательно, частоту каждой составляющей спектра излучения, принимаемого наблюдателем, можно вычислить путем умножения частоты соответствующей составляющей исходного сигнала (излучения, генерируемого источником) на постоянное

число, равное указанной величине. Таким образом, рассматриваемое смещение частотного спектра является мультипликативным (т.е. результатом умножения). При таком преобразовании, как показано в [1, 2], происходит процесс транспонирования частоты спектра.

Введя обозначение для коэффициента транспонирования частоты $k_f = 1/(z + 1)$, получим выражение, позволяющее определять частоту составляющих преобразованного сигнала:

$$f_r = k_f f_s.$$

Такая же ситуация возникает при рассмотрении локации подвижных объектов. При приближении или удалении объекта вследствие различной скорости смещения разных фрагментов сигнала [3, 4] происходят изменения масштаба времени излучаемого объектом сигнала пропорционально коэффициенту трансформации временного масштаба

$$k_t = t' / t,$$

где t' и t — длительности преобразованного и исходного сигналов соответственно.

Спектр сигнала при этом испытывает доплеровский сдвиг, зависящий от скорости движения объекта и характеризующийся как мультипликативный перенос [2, 5], при котором каждая составляющая частотного спектра умножается на коэффициент транспонирования:

$$k_f = f_{rs} / f_{ss},$$

где f_{rs} и f_{ss} — частоты преобразованного (принимаемого наблюдателем) и исходного (излучаемого источником) сигналов соответственно; при этом

$$k_t = 1 / k_f. \quad (2)$$

При подвижном источнике величина доплеровского смещения спектра излучения, так же как и коэффициент транспонирования k_f , зависит от скорости [3] движения источника:

$$k_f = 1 \pm 2v_r / c,$$

где v_r — радиальная скорость источника излучения.

Описанное мультипликативное преобразование спектра необходимо отличать от широко используемого в радиотехнике аддитивного преобразования. На рис. 1 показаны названные преобразования: *а* — аддитивное, *б* — мультипликативное.

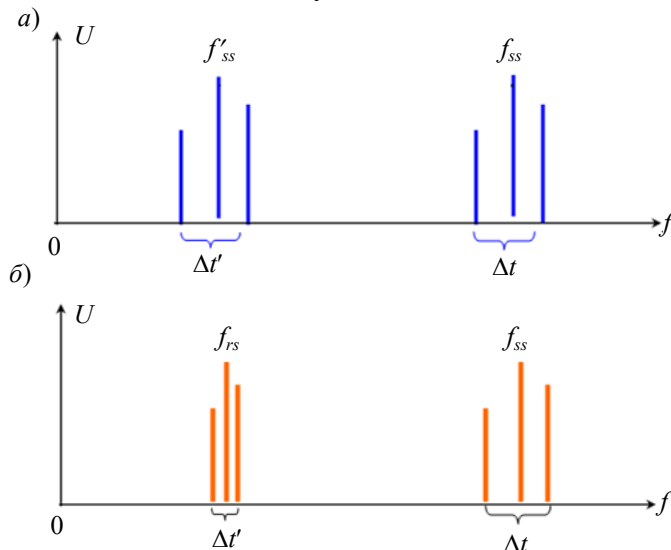


Рис. 1

Аддитивное преобразование реализуется путем гетеродинирования сигнала. Очевидно, подобная операция не приемлема для реализации мультипликативного переноса частотного спектра. В данном случае для преобразования спектра используется фактор соответствия изменения параметров сигнала в частотной области изменению сигнала во временной области, что следует, например, из соотношения (2). Монотонное расширение или сжатие частотного

спектра можно реализовать, смещая фрагменты исходного сигнала во времени [1, 2]. Согласно результатам исследований [1, 2], требуемый эффект проявляется при соответствующем поставленной задаче выборе частоты квантования сигнала и параметров, характеризующих смещение фрагментов исходного сигнала во времени:

$$T = \Delta T / (1/k_f - 1),$$

где T — интервал времени, определяющий длительность смещаемого фрагмента; ΔT — отрезок времени, соответствующий величине смещения, как правило, он принимается равным периоду квантования сигнала.

Было проведено моделирование процесса обработки принятого сигнала с линейно-частотной модуляцией, отраженного от подвижного объекта, без компенсации и с компенсацией доплеровского смещения частоты. Оптимальная обработка производилась путем вычисления взаимной корреляционной функции (ВКФ) опорного (преобразованного) и принятого сигналов. На рис. 2 представлена ВКФ сигналов: a — без компенсации доплеровского смещения частоты, b — с компенсацией доплеровского смещения частоты в приемном канале. Сравнение графиков показывает высокую эффективность обработки сигнала с компенсацией доплеровского смещения частоты, осуществляемой на основе указанного выше метода.

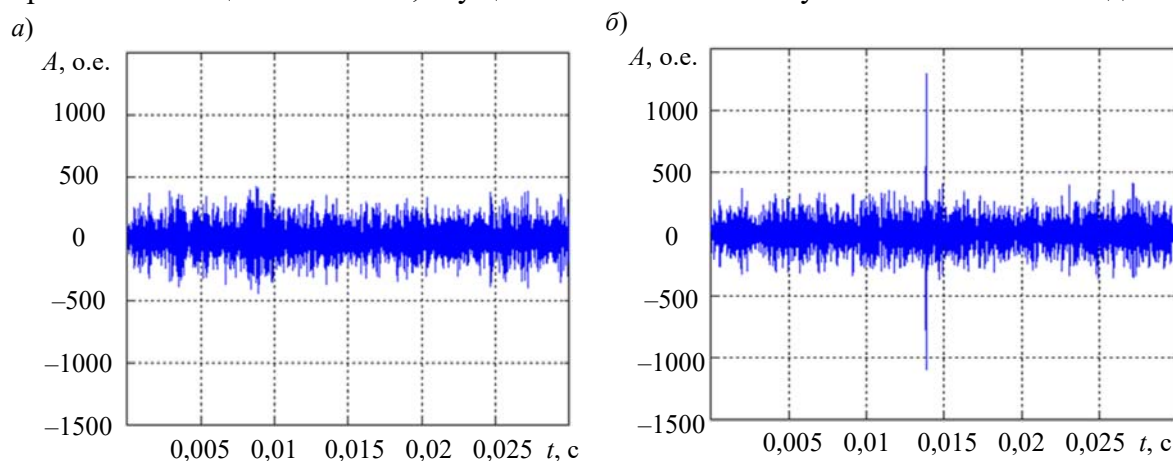


Рис. 2

Как показано в работе [3], необходимость компенсации смещения возникает в случае, если коэффициент доплеровской дисперсии $k_{dd} > 1$, при этом

$$k_{dd} = (2v_r / c) T_s P, \quad (3)$$

где T_s — длительность принимаемого сигнала; P — ширина полосы частот сигнала.

Компенсация доплеровского смещения частоты возможна в довольно узком диапазоне скоростей движения объекта (при большом значении параметра $T_s P$). Для расчета диапазона скорости, в котором возможна компенсация при заданных временных параметрах, целесообразно использовать выражение (3), принимая v_r за Δv_r , т.е. минимальный диапазон. При этом значение коэффициента k_{dd} задается в зависимости от вида зондирующего сигнала, и оно может быть существенно меньше единицы. Следовательно, построение системы должно быть многоканальным с компенсацией доплеровского смещения частоты в соответствии с назначенным диапазоном скорости объекта для данного канала.

Возможность компенсации доплеровского смещения частоты независимо от вида сигнала с последующей его оптимальной обработкой позволяет использовать зондирующие сигналы с большой базой. Это обеспечивает увеличение точности системы и, что наиболее важно, создание помехозащищенных систем.

Предлагаемый подход в обработке сигнала делает возможным построение радиолокационных систем с новым качеством, принципиально отличающихся от существующих.

Рассмотрим пассивную радиолокационную систему, работающую в доплеровском режиме, представленную на рис. 3, где 1, 2 — радиолокаторы, 3 — подвижный объект, 4 — устройство обработки сигналов.

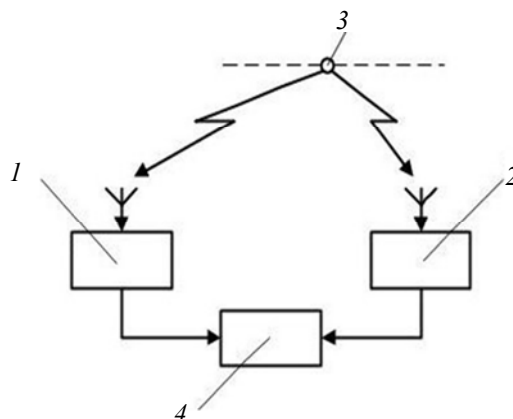


Рис. 3

Прием сигналов от движущегося объекта осуществляется посредством двух разнесенных в пространстве радиолокаторов. Вследствие различия углов между вектором скорости движения объекта и направлениями на радиолокаторы частоты радиосигналов будут иметь различные доплеровские смещения. Компенсация разницы указанных доплеровских смещений осуществляется путем транспонирования частотного спектра сигнала одного из локаторов. Описание данного способа и реализующее его устройство представлены в работе [6].

С использованием сигнала любого из радиолокаторов в качестве опорного осуществляется совместная оптимальная обработка сигналов, например, путем вычисления ВКФ. При этом частотные спектры шума сигналов, принимаемых разными радиолокаторами, из-за выполненного смещения будут не коррелированы и их влияние на полученный сигнал будет минимальным. Отсутствие зондирующего излучения обеспечивает скрытность системы и способствует увеличению ее помехозащищенности.

Если рассмотренное преобразование частотного спектра сигналов применить для объяснения природы фонового излучения, становится понятным, что фоновое излучение есть результат излучения множества звезд, частотный спектр которого сдвинут влево от своего номинального значения до минимального, приближающегося к нулевому. При этом изменение частоты принимаемых сигналов происходит не только за счет движения звезд, но и за счет свойства пространства преобразовывать сигнал [1] при его распространении. Как следует из этой же работы, степень уменьшения частоты зависит от расстояния, на котором находится источник излучения. Расстояние может быть практически любым. Отсюда понятна неограниченность частотной полосы фонового излучения и широкополосность фиксируемых колебаний, не только интенсивность которых, но и частота излучения гармоник зависят от расстояния.

Таким образом, мультипликативный подход к преобразованию частотного спектра сигнала позволяет обосновать как принципы действия новых устройств, так и объяснить с реальных позиций существующие в электродинамике явления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Атнашев А. Б.* Принцип относительности. Спектры. СПб: Изд-во „Менделеев“, 2014. 30 с.
2. *Атнашев А. Б.* Транспонирование частотного спектра сигнала и его корреляционная обработка // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 3. С. 45—49.
3. *Кук Ч., Бернфельд М.* Радиолокационные сигналы: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1971. С. 310 — 317.
4. *Атнашев А. Б., Серегин С. В.* Обработка широкополосных сигналов с доплеровским сдвигом частоты // Тр. ВМИРЭ им. А. С. Попова. 2010. № 1 (5). С. 24—31.

5. Пат. 2300277 РФ, МПК H04B 1/04 . Способ обработки сигнала / А. Б. Атнашев, В. Б. Атнашев. Оpubл. 10.06.2006. Бюл. № 18.
6. Пат. 2564995 РФ, МПК G01S13/00. Способ пассивной локации подвижного объекта / А. Б. Атнашев, В. В. Какаев, А. В. Комиссаров, В. В. Семенов. Оpubл. 10.10.2015. Бюл. № 28.

Сведения об авторах

- Анатолий Борисович Атнашев** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского; ст. научный сотрудник
E-mail: atn2@mail.ru
- Владимир Григорьевич Цыбрин** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского; преподаватель;
E-mail: vladgrigor@mail.ru

Поступила в редакцию
07.10.2020 г.

Ссылка для цитирования: Атнашев А. Б., Цыбрин В. Г. Мультипликативная обработка частотного спектра излучения подвижного объекта // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 3. С. 208—212.

**MULTIPLICATIVE PROCESSING OF THE FREQUENCY SPECTRUM
OF THE MOBILE OBJECT RADIATION**

A. B. Atnashev, V. G. Tsybrin

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: atn2@mail.ru

The problems of large-base electromagnetic sounding signals processing based on time scale transformation are considered. Application of the described method of signal conversion is shown to make it possible to compensate for the time shift, as well as the Doppler frequency shift of a signal of any structure, and to carry out optimal signal processing regardless of the speed of approach to the object. This provides increased noise immunity and the ability to accurately resolve targets.

Keywords: multiplicative, additive, correlation, transform, transpose, Doppler, heterodyning

REFERENCES

1. Atnashev A.B. *Printsip otnositel'nosti. Spektry* (The Principle of Relativity. Spectra), St. Petersburg, 2014, 30 p. (in Russ.)
2. Atnashev A.B. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, no. 3(51), pp. 45–49. (in Russ.)
3. Cook Ch.E. and Bernfeld M. *Radar signals*, Artech House, NOTWood MA, 1993.
4. Atnashev A.B., Seregin S.V. *Trudy VMIRE im. A.S. Popova* (Proceedings of the V.I. A.S. Popova), 2010, no. 1(5), pp. 24–31. (in Russ.)
5. Patent RU 2004139135, H04B 1/04, *Sposob obrabotki signala* (Signal Processing Method), A.B. Atnashev, V.B. Atnashev, Patent application no. 2300277, Priority 23.12.2004, Published 10.06.2006, Bulletin 18. (in Russ.)
6. Patent RU 2014109334, G01S13/00, *Sposob passivnoy lokatsii podvizhnogo ob"yekta* (Method for Passive Location of a Moving Object), A.B. Atnashev, V.V. Kakayev, A.V. Komissarov, V.V. Semenov. Patent application no. 2564995, Priority 11.03.2014, Published 10.10.2015, Bulletin 28. (in Russ.)

Data on authors

- Anatoly B. Atnashev** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy; Senior Scientist;
E-mail: atn2@mail.ru
- Vladimir G. Tsybrin** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy; Lecturer;
E-mail: vladgrigor@mail.ru

For citation: Atnashev A. B., Tsybrin V. G. Multiplicative processing of the frequency spectrum of the mobile object radiation. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 3. P. 208—212 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-3-208-212