

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ДАЛЬНОЙ СВЯЗИ

Введение

Рассмотрим задачу организации связи с удаленным подвижным объектом. Пусть удаленный объект удовлетворяет следующим условиям:

- расстояние до объекта велико,
- скорость движения объекта не постоянна, либо неизвестна до сеанса связи,
- энергетические возможности удаленного объекта ограничены ресурсом его автономного источника питания.

В качестве практического примера такого удаленного объекта может выступать искусственный спутник другого небесного тела Солнечной системы, автоматическая межпланетная станция, космический корабль и т.п. (в дальнейшем – космический аппарат, КА). Во всех этих случаях размещение передатчика большой мощности на борту КА невозможно по причинам ограниченной энергетической обеспеченности КА. Также затруднено применение остронаправленной антенны с большим коэффициентом усиления из-за ограничений массогабаритных показателей аппаратуры КА возрастающих требований к точности наведения этой антенны на антенну земной станции (ЗС).

Недостаточный энергетический потенциал передающей аппаратуры КА и большое расстояние между КА и ЗС приводят к малому отношению сигнал/шум в приемном тракте. При этом принимаемая информация искажается, или прием вообще оказывается невозможен. Наиболее распространенным методом обработки информации в подобной ситуации является накопление. Энергия передаваемого колебания пропорциональна мощности передатчика и

длительности посылки. Таким образом, отношение сигнал/шум $q = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{N_0}}$ возрастает про-

порционально корню из длительности импульса (информационной посылки). Оптимальная обработка сигнала в приемном устройстве проводится в предположении об априорно известных и неизменных параметрах обрабатываемого сигнала. В рассматриваемой задаче эти предположения могут не выполняться из-за относительного движения КА и ЗС.

Постановка задачи

Рассмотрим простейшую систему связи, использующую частотную манипуляцию [1, 2]. Пусть передается дискретная информация, причем передаче логической «0» соответствует формирование аппаратурой КА колебания с частотой f_1 (посылка A_1), а передаче логической «1» – соответственно, с частотой f_2 (посылка A_2).

За счет относительного движения КА и ЗС частоты принимаемых ЗС колебаний будут не равны f_1 и f_2 . Изменение частоты может быть определено по формуле доплеровского сдвига частоты –

$$\Delta f_i = \frac{v_p}{c} f_i, \quad (1)$$

где f_i – несущая частота текущей (i -й) посылки, v_p – радиальная скорость приемника относительно передатчика, а c – скорость света в вакууме [3, 4]. В случае, когда скорость КА априорно известна, есть возможность определить радиальную скорость v_p движения КА относительно ЗС и рассчитать частоты сигналов на входе приемного тракта ЗС – f_1' и f_2' .

В случае отсутствия априорной информации о скорости КА, возникает задача оценивания этой скорости по принимаемому сигналу. При условии, что скорость движения КА за

время посылки не изменяется, эту задачу можно решить многоканальным корреляционным либо фильтровым приемником [5 – 10].

Наиболее рациональным в такой ситуации будет применение многоканального приемника, имеющего два идентичных блока – для посылок A_1 и A_2 соответственно. При этом в каждой группе имеется совокупность каналов, эквидистантных по частоте, причем среднее значение частоты соответствует априорной оценке частоты соответствующей посылки. После успешного приема каждой посылки среднее значение частоты корректируется [10, 11]. Таким образом, схема приемного устройства состоит из двух блоков, подобных приведенному на рис. 1.

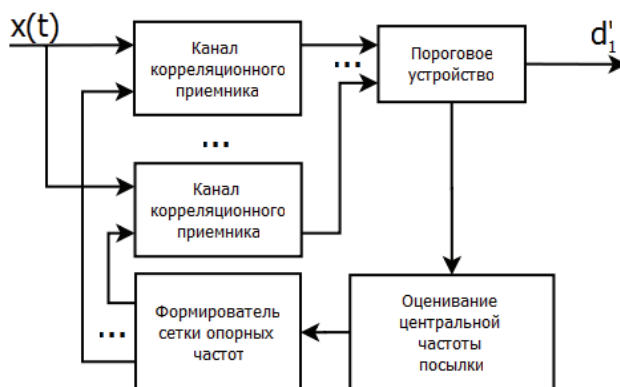


Рис. 1

Можно рассмотреть две альтернативы подобной схеме. Первый вариант – двухканальный корреляционный приемник, частоты опорных сигналов в каналах которого равны соответственно f_1 и f_2 («схема 2», рис. 2, а). В такой схеме, очевидно, по мере роста радиальной скорости КА v_p , будут возрастать потери энергии и снижаться вероятность правильного обнаружения [8]. Второй альтернативой является многоканальный приемник, перекрывающий весь диапазон возможных частот принимаемой посылки – от $f_1 - \Delta f_{1\max}$ до $f_2 + \Delta f_{2\max}$ с постоянным шагом, определенным исходя из допустимой потери вероятности правильного обнаружения, заданной априорно («схема 3», рис. 2, б, [9]).

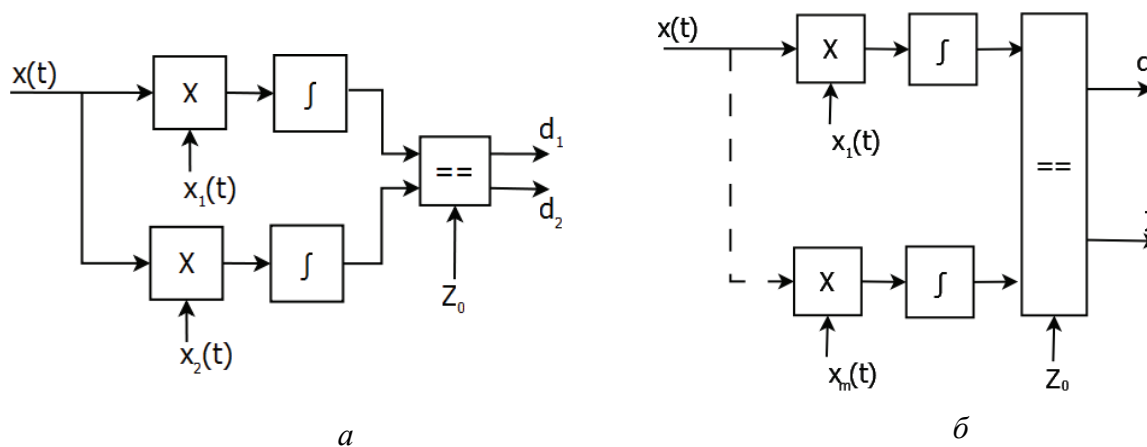


Рис. 2

Для подобной задачи характерны следующие ситуации:

- правильный прием ($A_1 \rightarrow A_1$ с вероятностью P_{11} или $A_2 \rightarrow A_2$ с вероятностью P_{22}),
- ошибочный прием ($A_1 \rightarrow A_2$ с вероятностью P_{12} или $A_2 \rightarrow A_1$ с вероятностью P_{21}),
- пропуск посылки A_1 с вероятностью P_{01} или посылки A_2 с вероятностью P_{02} ;
- ложная тревога (решение о регистрации посылки A_1 или A_2 в отсутствие посылки), P_{10}, P_{20} соответственно;
- правильное необнаружение (отсутствие полезного сигнала и отсутствие решения), P_{00} .

Обозначим вероятности этих событий как $P_{\Pi}, P_O, P_{\Pi\Pi}, P_{\text{ЛТ}}$ и $P_{\text{ПН}}$. Вероятность ложной тревоги зафиксируем, установив соответствующее значение порога (примем критерий Неймана – Пирсона [3 – 5]). Тогда можно записать:

$$P_{\Pi} = P_{11} + P_{22}, P_O = P_{12} + P_{21}, P_{\Pi\Pi} = P_{01} + P_{02}, P_{\text{ЛТ}} = P_{10} + P_{20}.$$

Представление результатов

На рис. 3 приведена зависимость вероятности правильного приема от отношения сигнал/шум, построенная для схемы 2.

При этом принято, что частоты посылок A_1 и A_2 в точности равны ожидаемым f_1 и f_2 . Данная характеристика является опорной в том смысле, что показывает предельно достижимую величину вероятности правильного обнаружения для данного фиксированного отношения сигнал/шум и заданной вероятности ложной тревоги. Кривые 1 – 5 соответствуют различным величинам вероятности ложной тревоги ($10^{-1} - 10^{-5}$ соответственно). При построении характеристик, приведенных на рис. 3 принято, что $|f_2 - f_1| \gg \Delta f$, где Δf – ширина полосы частот посылки.

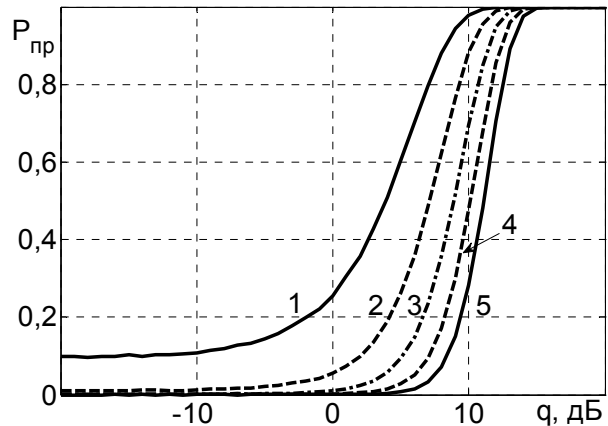


Рис. 3. Зависимость вероятности правильного приема от отношения сигнал/шум

Разность частот посылок определяет ширину полосы канала связи и в реальной системе будет ограничена требованиями рационального использования частотного ресурса [1, 2]. Рассмотрим влияние разности частот посылок на вероятность ошибочного приема (рис. 4). Кривая 1 соответствует отношению сигнал/шум $q=10$ дБ, 2 – $q=15$ дБ, 3 – $q=20$ дБ.

С ростом разности частот посылок A_1 и A_2 , вероятность ошибочного приема снижается. При этом также нужно иметь в виду, что наблюдаемые частоты посылок могут изменяться вследствие изменения радиальной скорости движения КА относительно ЗС. Это изменение накладывает ограничения на минимальную разность частот:

$$\Delta f_{\min} \geq \Delta f_B + \Delta f_{\text{Дмакс}},$$

где Δf_B – разность частот, при которой достигается требуемая вероятность ошибочного приема, а $\Delta f_{\text{Дмакс}}$ – максимальный доплеровский сдвиг частоты посылки.

Рассмотрим влияние доплеровского сдвига частоты на характеристики системы связи. Для этого введем обозначение

$$\varepsilon_f = \frac{f_i - f'_i}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (2)$$

относительная ошибка установки частоты посылки. При этом, поскольку $f_0 \ll f_i$, разностью величин (2) для посылок A_1 и A_2 можно пренебречь. Результаты моделирования приведены на рис. 5, 6. При этом кривая 1 соответствует отношению сигнал/шум $q=10$ дБ, а кривая 2 – $q=20$ дБ.

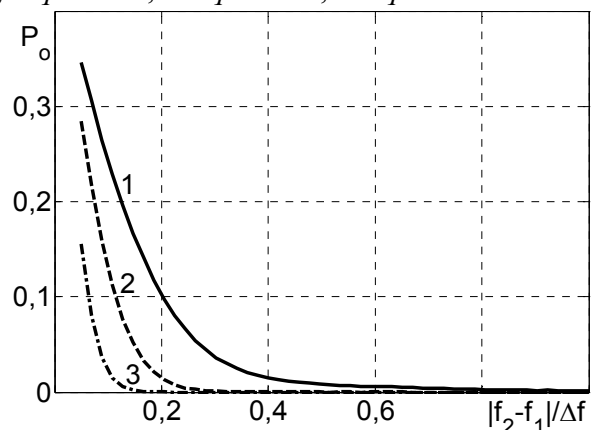


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибочного приема от разности частот посылок

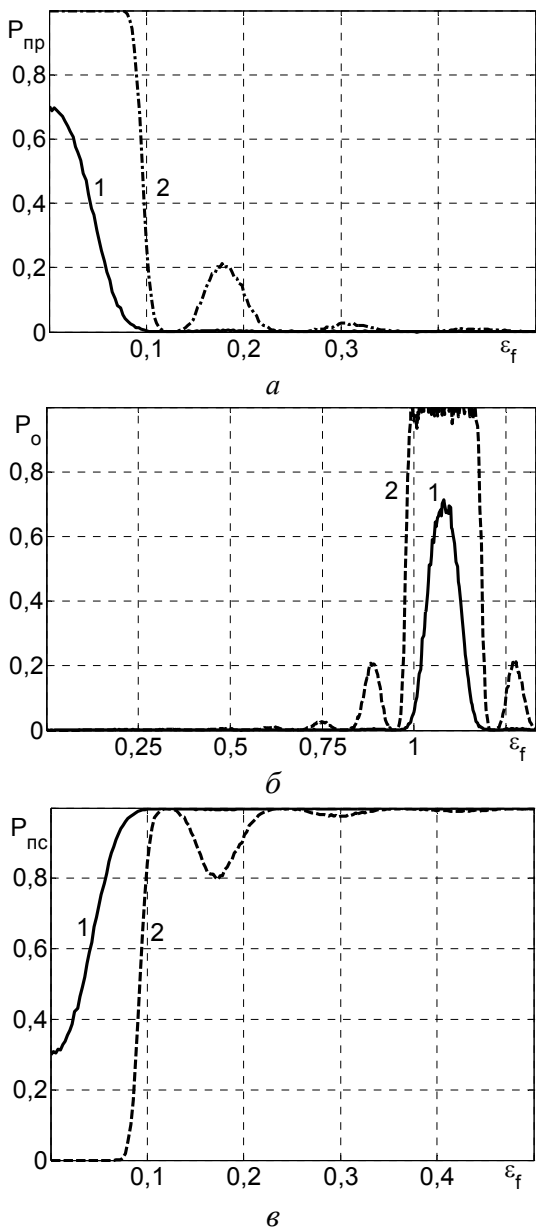


Рис. 5

Для схем 1 и 3, за счет перекрытия диапазона возможных значений частоты сигнала, вероятность правильного обнаружения резко уменьшается при $\epsilon_f \approx 0.5$, что соответствует границе между областями возможных частот посылок 1 и 2.

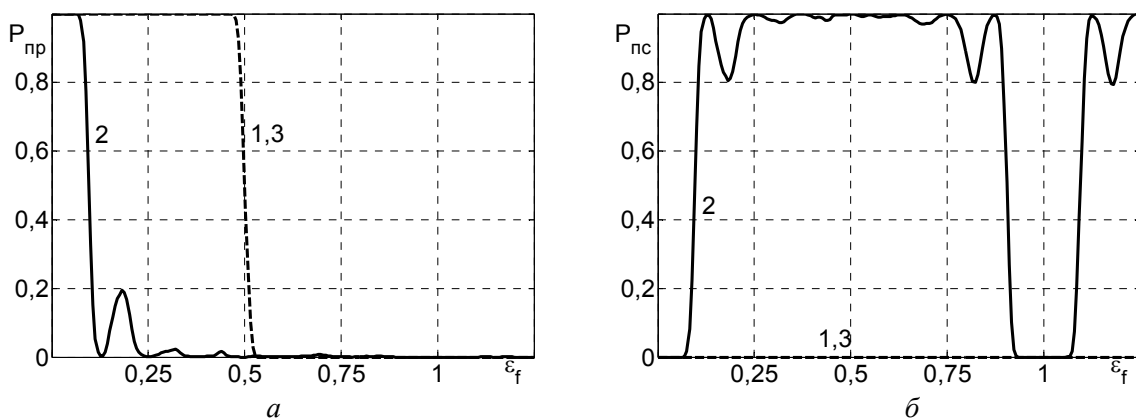


Рис. 6

Вероятность правильного обнаружения снижается с ростом ошибки установки частоты посылок (рис. 5, а). Это снижение менее заметно при большом отношении сигнал/шум (кривая 2). Вероятность ошибочного приема возрастает с увеличением ошибки установки частоты посылки (рис. 5, б). Максимальное значение вероятности ошибочного приема достигается в предельном случае $\epsilon_f \approx 1$, что соответствует $f'_1 \rightarrow f_2$. В этой ситуации правильное различение сигналов невозможно для любой схемы приемника.

Вероятность пропуска сигнала возрастает с ростом ошибки установки частоты (рис. 5, в). При этом оказывается, что при $\epsilon_f < 0.5$ наиболее вероятен именно пропуск, а не ошибочный прием сигнала. Дополнительные пики на графиках вероятностей (рис. 5, а – в) соответствуют второму и последующим максимумам спектральной плотности мощности сигнала.

Вероятность пропуска сигнала может быть снижена путем применения многоканальных приемников (схемы 1, 3, [9]), что иллюстрируют результаты моделирования, приведенные на рис. 6, 7. Вероятность ложной тревоги установлена на уровне 10^{-3} , а отношение сигнал/шум составляет 20 дБ. С увеличением ϵ_f вероятность правильного обнаружения снижается (рис. 6, а). При этом для схемы 2 это снижение начинается раньше. Спад вероятности правильного обнаружения отмечает границу главного лепестка энергетического спектра сигнала [12] (в данном модельном эксперименте $\Delta f = 0.125 \cdot (f_2 - f_1)$).

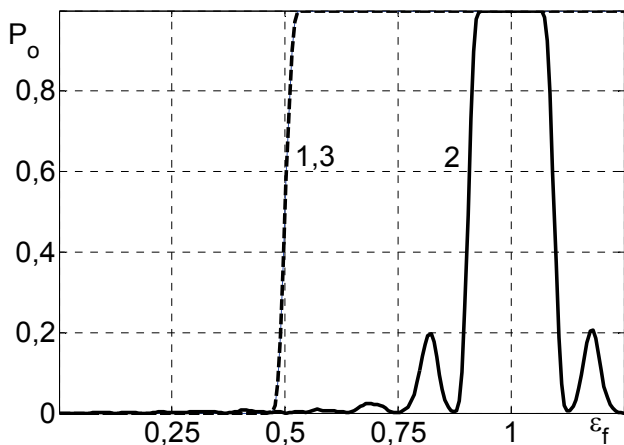


Рис. 7

Таким образом, при смещении частоты посылки относительно заданного значения, схемы 1 и 3 обеспечивают постоянную вероятность пропуска сигнала во всем диапазоне возможных значений частоты посылки, при условии, что спектры посылок не перекрываются.

В рамках данной задачи схемы 1 и 3 равноценны по своим параметрам.

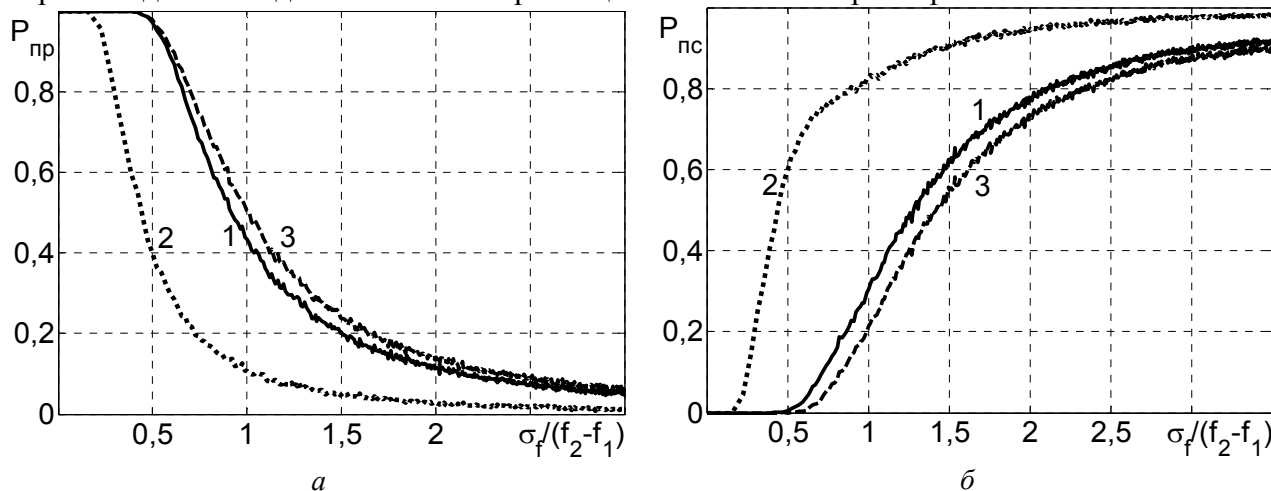


Рис. 8

На рис. 8 приведены результаты моделирования для схем 1 – 3 (кривые 1 – 3 соответственно) для случайной ошибки установки частоты посылки. При этом закон вариаций частоты принят нормальным, среднее значение вариаций частоты равно 0, а среднеквадратическое отклонение принято равным σ_f . Указанные на горизонтальной оси графиков значения σ_f нормированы к разности частот посылок $f_2 - f_1$.

На рис. 8, а приведена зависимость вероятности правильного обнаружения сигнала от СКО вариаций частоты посылки. Для схемы 2 наблюдается наиболее быстрый спад вероятности с ростом СКО, при этом для остальных двух схем спад начинается при $\epsilon_f \approx 0.5$, около границы, разделяющей области возможных частот посылок 1 и 2. Схемы 1 и 3 обеспечивают почти идентичные результаты, при незначительном преимуществе схемы 3. Уменьшение вероятности правильного обнаружения обусловлено ростом вероятности пропуска сигнала (рис. 8, б). Вероятность ошибочного приема принимает для всех схем максимальное значение в области $\epsilon_f \approx 1$, когда переходы $f_1 \rightarrow f_2$ и $f_2 \rightarrow f_1$ наиболее вероятны. Для схемы 2 этот переход существенно менее вероятен по сравнению со схемами 1 и 3, т.к. при таком смещении по частоте вероятность пропуска сигнала уже значительна. В данной задаче схемы 1 и 3 практически равноценны. Схема 3 обеспечивает несколько лучшие характеристики,

Для схемы 2 спад вероятности правильного обнаружения сопровождается синхронным возрастанием вероятности пропуска сигнала (рис. 6, б). Для схем 1 и 3 вероятность пропуска сигнала во всем диапазоне значений ϵ_f стремится к нулю.

Возрастание вероятности ошибочного приема для схем 1 и 3 начинается при $\epsilon_f \approx 0.5$, на границе областей возможных значений частот посылок 1 и 2 (рис. 7).

однако при аппаратурной реализации потребует существенно более высоких затрат за счет большего числа параллельных каналов коррелятора [9].

В ряде задач обработки сигналов априорная оценка радиальной скорости цели недоступна [13, 14]. В таком случае наиболее предпочтительным является использование многоканального приемного устройства – например схем 1 или 3 в терминологии данной статьи. Вместе с тем, априорная информация о форме и длительности сигнала все же необходима для реализации любой из рассмотренных схем приемных устройств.

Выводы

Применение многоканальных схем в приемных устройствах систем связи с подвижными объектами позволяет повысить вероятность правильного приема сообщений при сохранении энергетических показателей системы на прежнем уровне. При этом нет необходимости в априорной оценке относительной скорости движения источника сигнала, но в то же время такая оценка может позволить использовать схему с меньшим числом каналов и понизить вычислительные затраты на реализацию процедур обработки сигналов в приемном тракте.

Список литературы: 1. *Скляр, Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение : пер. с англ. – М. : Изд. дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с. 2. *Прокис, Дж.* Цифровая связь ; пер. с англ. ; под ред. Д.Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 2000. – 800 с. 3. *Финкельштейн, М.И.* Основы радиолокации : учебник для вузов / М.И.Финкельштейн. – 2-е изд. – М. : Радио и связь, 1983. – 536с. 4. *Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория : справочник / Я.Д. Ширман, Ю.И. Лосев, Н.Н. Миневрин и др. ; под ред. Я.Д.Ширмана. – М. : ЗАО «МАКВИС», 1998. – 828с.* 5. *Тихонов, В.И.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учеб. пособие для вузов / В.И.Тихонов, В.Н.Харисов – М. : Радио и связь, 2004. – 608 с. 6. *Radar signal processing.* Robert J. Purdy et.al., Lincoln Laboratory Journal, volume 12, number 2, 2000, pp. 297 – 320. 7. *Meikle, H.* Modern radar systems [текст] / H. Meikle. – Boston: Artech House, 2001. – 581р. 8. *Литвин-Попович, А.И.* Обнаружение сигналов в условиях априорной параметрической неопределенности / А.И. Литвин-Попович // Радиотехника. – 2012. – Вып. 168. – С.16 – 21. 9. *Литвин-Попович, А.И.* Обнаружение и измерение параметров сигналов в параллельных системах обработки / А.И. Литвин-Попович // Радиотехника. – 2012. – Вып.170. – С. 125-131. 10. *Литвин-Попович, А.И.* Обнаружение сигналов и измерение их параметров в следящих радиотехнических системах / А.И. Литвин-Попович // Технологический аудит и резервы производства. – Харьков : Технологический центр, 2013. – №6/1(14). – С. 30-34. 11. *Фалькович, С.Е.* Оценка параметров сигнала. – М. : Сов. радио, 1970. – 336с. 12. *Баскаков, С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. Изд-е 5-е. / С.И. Баскаков. – М. : Высш. шк., 2005. – 462с. 13. *Fridman, P.A.* SETI: transmission rate of radio communication and the signal’s detection / Acta Astronautica 69 (2011), 777 – 787. 14. *Siemion, A.* et.al. New SETI sky surveys for radio pulses / Acta Astronautica 67 (2010) 1342–1349.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 11.08.2014