

Эффективность функционирования локальных радиосетей в сложной радиоэлектронной обстановке

Efficiency of functioning of local radio networks in a complex radio electronic environment

Дворников / Dvornikov S.

Сергей Сергеевич

(dvornik92@mail.com)

кандидат технических наук, доцент.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»

(ГУАП), старший преподаватель кафедры

конструирования и технологий электронных

и лазерных средств.

г. Санкт-Петербург

Дворников / Dvornikov S.

Сергей Викторович

(practicdsv@yandex.ru)

доктор технических наук, профессор.

ГУАП, профессор кафедры радиотехнических

и оптоэлектронных комплексов.

г. Санкт-Петербург

Леонов / Leonov D.

Денис Михайлович

(practicdsv@yandex.ru)

ФГКВООУ ВО «Военная академия связи имени

Маршала Советского Союза С. М. Буденного» МО РФ

(ВАС им. С. М. Буденного),

адъюнкт кафедры организации связи.

г. Санкт-Петербург

Махфуд / Mahfoud M.

Мохамед Гассан

(practicdsv@yandex.ru)

ВАС им. С. М. Буденного,

адъюнкт кафедры безопасности связи.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: эффективность сетей радиосвязи – efficiency of radio communication networks; режим с программной перестройкой рабочей частоты – software hopping mode; блокирование каналов – channel blocking.

Представлены результаты оценки эффективности функционирования корпоративных сетей радиосвязи, использующих радиостанции с программной перестройкой рабочей частоты. Проанализированы условия, приводящие к нарушению связи. Обоснованы показатели эффективности и разработан аналитический аппарат расчета вероятности блокирования частотных каналов. Демонстрируются результаты моделирования, характеризующие зависимость допустимого количества одновременно работающих средств в ограниченном районе, с учетом возможного блокирования каналов.

The results of evaluating the effectiveness of the functioning of corporate radio communication networks using radio stations with software tuning of the operating frequency are presented. The conditions leading to communication failure are analyzed. Efficiency indicators are substantiated and an analytical apparatus for calculating the probability of blocking frequency channels is developed. Simulation results are shown that characterize the dependence of the allowable number of simultaneously operating facilities in a limited area, taking into account the possible blocking of channels.

Введение

Организация корпоративных сетей, как правило, базируется на использовании транкинговых систем радиосвязи [1, 2]. Удобство их применения обусловлено строгой регламентацией алгоритмов работы. Вместе с тем такой подход существенно ограничивает доступный частотный ресурс [3], поэтому в последнее время в коммерческом секторе идет активное продвижение радиостанций, реализующих режим псевдослучайная перестройка рабочей частоты (ППРЧ) (FHSS – англ. frequency-hopping spread spectrum) [4-6], предусматривающий синхронную смену частот абонентов, порядок которой не известен остальным пользователям.

Прагматичность такого решения обусловлена в первую очередь не столько обеспечением конфиденциальности радиосообщения, сколько открывающимися возможностями по расширению возможности одновременной работы большого числа абонентов в ограниченном частотном диапазоне. Так, например, в технологии eXtreme Radio Service (eXRS) режим ППРЧ предусматривает всего лишь выбор 50 рабочих частот из 700 возможных [7]. В результате такого подхода открывается возможность получения порядка десяти миллиардов уникальных частотно-временных матриц, которые используются для орга-

низации сеансового алгоритма радиосвязи. Благодаря такому набору организуемых комбинаций для режима ППРЧ минимизируется фактор взаимного совпадения частотных планов одновременно работающих независимых абонентов [8, 9].

Другой интересный аспект организации режима с ППРЧ связан с минимизацией потери качества связи, обусловленной замираниями сигналов ввиду многолучевого распространения радиоволн [10]. Именно поэтому в технологиях Bluetooth предусмотрена скачкообразная смена рабочих частот. Аналогичный подход, получивший название Slow frequency hopping, получил свое применение в протоколах стандарта GSM [11].

Однако применение даже такого уникального режима, как ППРЧ, не исключает проблем с обеспечением электромагнитной совместимости (ЭМС) при развертывании таких сетей в районах, где организованы радиолинии на основе традиционных радиостанций [12, 13]. Таким образом, вопросы оценки эффективности локальных радиосетей все еще актуальны и требуют дальнейшей проработки.

Обоснование показателей оценки эффективности

Оценку эффективности функционирования любой радиосети целесообразно проводить с позиций общей теории систем [14-16], используя показатели, наиболее полно учитывающие существенные характеристики и свойства, проявляющиеся в процессе управления. Согласно [17, 18] таковыми показателями являются достоверность, безопасность и своевременность.

Так, показателем по своевременности может рассматриваться необходимое время для передачи сообщений заданного объема [19, 20]. При этом со стороны системы управления задаются требования к допустимому времени пребывания сообщений, которые зависят не только от вида связи, но и от категории срочности информации, определяемой диспетчером [21-23].

В интересах оценки достоверности связи, использующих дискретные виды передач, наибольшее распространение получил такой показатель как вероятность ошибки приема элемента сигнала $P_{\text{ош}}$ или битовой ошибки P_b [25]. Тогда критерием качества выступает допустимая вероятность ошибки $P_{\text{ош доп}}$, которая зависит от вида модуляции, и используемых мер по повышению помехоустойчивости (перемежение, помехоустойчивое кодирование и т.д.). [24, 25].

Поскольку основные мероприятия, связанные с выполнением требований безопасности связи проводятся на вторичных сетях и, как правило, ограничиваются техническим маскированием речи, а также соблюдением регламента радиосвязи, то их выполнение на данном этапе целесообразно вывести в рамки ограничений.

С учетом введенных допущений определим способность сети радиосвязи по обеспечению выполнения заданных требований по достоверности и своевременности передачи сообщений как ее эффективность [26], которую можно оценивать по показателям:

- достоверности передачи с вероятностью ошибки не выше допустимой $P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}})$;
- своевременности передачи, т.е. вероятности того, что время, затраченное на передачу сообщений, не превысит допустимого значения $P(T_{\text{пер}} \leq T_{\text{пер доп}})$ при условии выполнения требований по достоверности.

Поскольку значения вероятностей $P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}})$ и $P(T_{\text{пер}} \leq T_{\text{пер доп}})$ определяются характеристиками радиоканала, то, следовательно, и эффективность радиосети также может быть рассчитана на основе аналитических моделей с учетом требований, предъявляемых к информационному обмену. С этой целью предлагается разработать модель, учитывающую особенности реализации режима ППРЧ при организации информационного обмена в сети.

Разработка аналитической модели составной радиолинии

Искомую модель синхронной сети радиосвязи с ППРЧ предлагается разрабатывать с позиций составной радиолинии. Такой подход обоснован в [27] и активно применяется на практике. Особенностью разрабатываемой модели является учет сторонних источников радиоизлучений (СИР), приводящих к ухудшению условий ЭМС [28]. Будем полагать, что работа СИР предполагает использование диапазона частот, совпадающего с полосой ППРЧ, поэтому их излучения будем рассматривать в качестве потенциальных источников помех для абонентов исследуемой радиосети, использующей режим с ППРЧ. В общем случае указанные излучения для абонентов сети будут иметь случайный характер и оказывать негативное влияние, приводящее к снижению эффективности ее функционирования.

Один из негативных эффектов работы СИР связан с блокированием (энергетической перегрузкой) частотных каналов, используемых для режима с ППРЧ [29]. Отметим, что дополнительными причинами, приводящими к нарушению связи (в данном случае – к блокированию) являются замирания, вызванные многолучевым распространением радиоволн, а также мешающие (помеховые) сигналы от других станций.

В общем случае вероятность блокирования частотного канала $P_{\text{бл}}$ зависит от соотношения количества частот n подверженных взаимным помехам к общему числу рабочих каналов m , задействованных при организации режима с ППРЧ:

$$P_{\text{бл}} = n / m, \tag{1}$$

В [27] обосновано, что в общем случае величину n можно учитывать следующим образом:

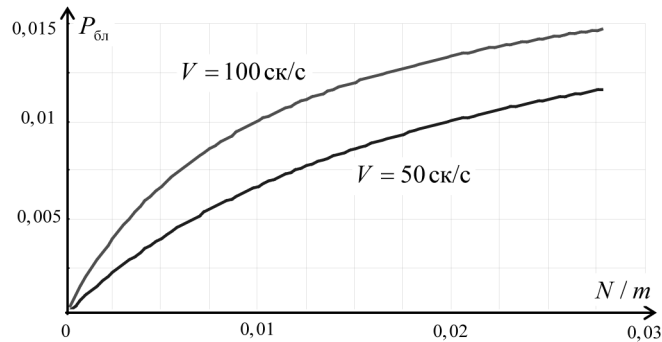


Рис. 1. Вероятность блокирования при различных параметрах

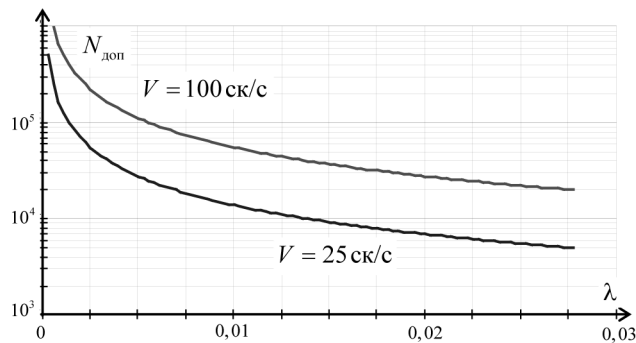


Рис. 2. Зависимость допустимого количества одновременно работающих средств в зависимости от скорости ППРЧ и интенсивность заявок

$$n = \sum_{i=1}^N iP_i, \quad (2)$$

$$n = \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^N iC_N^i (\lambda\tau)^i, \quad (4)$$

где N – общее количество радиосредств, совместно использующих группу из m частот, работа которых может привести к проблемам ЭМС; P_i – вероятность одновременной работы на излучение i радиостанций.

Величину P_i рассчитаем как

$$P_i = \frac{C_N^i (\lambda\tau)^i}{\sum_{j=0}^N C_N^j (\lambda\tau)^j}. \quad (3)$$

В выражении (3): λ представляет собой интенсивность заявок, определяемых удельной среднестатистической нагрузкой пользователя; τ – время работы на одной частоте в режиме с ППРЧ; j – количество радиостанций, не использующих данную частоту ($j = N - i$).

С учетом составляющих выражения (3) значений, формулу (2) перепишем к виду:

$$\rho = \sum_{j=0}^N C_N^j (\lambda\tau)^j.$$

Далее, преобразуем величину ρ в соответствии с биномом Ньютона [30]:

$$\sum_{j=0}^N C_N^j (\lambda\tau)^j = (1 + \lambda\tau)^N, \quad (5)$$

и перепишем формулу (3) в следующем виде:

$$P_i = C_N^i \frac{(1 + \lambda\tau)^i}{(1 + \lambda\tau)^N} = C_N^i \left(\frac{\lambda\tau^{-1}}{1 + \lambda\tau^{-1}} \right)^i \left(\frac{1}{1 + \lambda\tau^{-1}} \right)^{N-i}. \quad (6)$$

Полученное выражение представляет собой распределение Бернулли, характеризующее как вероят-

ность работы на излучение $\lambda\tau^{-1}/(1+\lambda\tau^{-1})$, так и вероятность противоположенного события $1/(1+\lambda\tau^{-1})$ [31].

С указанных позиций среднее значение n , т.е. величины, характеризующей количество одновременно излучающих радиосредств, можно рассматривать как среднее число успехов в серии из N проведенных биномиальных испытаний:

$$n = N \left(\frac{\lambda\tau^{-1}}{1 + \lambda\tau^{-1}} \right). \quad (7)$$

С учетом (7) выражение (1), характеризующее вероятность блокирования канала, примет следующий вид:

$$P_{\text{бл}} = \frac{N}{m} \left(\frac{\lambda\tau^{-1}}{1 + \lambda\tau^{-1}} \right). \quad (8)$$

В интересах анализа зависимости вероятности блокирования от числа средств, использующих одинаковый частотный план, для скорости ППРЧ $V = 100$ ск/с и 50 ск/с построен график, рис. 1.

Анализ результатов, представленных на рис. 1, показывает, что $P_{\text{бл}}$ существенно зависит от скорости ППРЧ. Это объясняется тем, что чем выше скорость, тем больше вероятность совпадения с сигналом СИР на рабочей частоте. Другим параметром, определяющим рост $P_{\text{бл}}$ является общее количество радиосредств, совместно использующих группу из m частот. Здесь также очевидно, что в интересах снижения $P_{\text{бл}}$ следует увеличивать задействованный частотный план, что не всегда возможно обеспечить на практике.

При этом следует учитывать, что значение (8) подразумевает собой вероятность того, что на частоте, используемой в режиме ППРЧ, в момент передачи на ней сигнала будет осуществляться работа СИР. Но из этого не следует, что однозначно произойдет нарушение связи, поскольку для этого необходимо обеспечение условия энергетического превышения мешающего сигнала над полезным.

Далее будем полагать, что если на выбранной частоте, используемой в режиме с ППРЧ, отсутствует помеха, обусловленная сигналом СИР, то вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$ в приеме элемента сигнала не превышает допустимое значение $P_{\text{ош}} < P_{\text{ош доп}}$ и связь обеспечивается с заданным качеством. Следовательно, вероятность ошибки в канале радиосвязи, определяемая только при условии блокирования, будет зависеть от количества пораженных случайными помехами частот, которое произошло в результате одновременной работы на излучение N СИР.

В этом случае можно определить допустимое количество одновременно излучающих радиосредств $N_{\text{доп}}$, при котором в канале радиосвязи еще выполняется требование по достоверности, используя подход, предложенный в [32]:

$$N_{\text{доп}} = \text{int} \left[\frac{(\tau + \lambda)(P_{\text{ош доп}} - P_0)2m}{\lambda(1 - 2P_{\text{ош доп}})} \right]. \quad (9)$$

где $\text{int} [x]$ – целая часть числа x .

Анализ полученного выражения, представленного на графиках рис. 2.

Представленные результаты на рис. 2 получены при текущем значении вероятности ошибки в канале равной $P_0 = 0,001$ для скорости ППРЧ $V = 100$ ск/с и 25 ск/с.

Заметим, что даже при высокой интенсивности работы СИР, с учетом того, что корпоративные сети охватывают не более десятка квадратных км, допустимое количество $N_{\text{доп}}$ СИР будет превышать тысячи единиц при $P_{\text{ош доп}} = 0,05$. Но, как уже подчеркивалось, расчетные значения в данном случае учитывают только сам факт возможного пересечения сигналов радиостанций организуемой сети и сигналов СИР. Поскольку количество радиосредств, одновременно находящихся в режиме излучения, есть величина случайная, то и обеспечение радиосвязи с требуемой достоверностью также будет характеризоваться случайной величиной, которая с учетом полученных выражений может быть рассчитана следующим образом:

$$P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}) \approx P(N \leq N_{\text{доп}}) = 1 - \sum_{i=N_{\text{доп}}}^N C_N^i (\lambda\tau)^i \left[\sum_{j=0}^N C_N^j (\lambda\tau)^j \right]^{-1}. \quad (10)$$

Полученное выражение представляет собой искомую аналитическую модель, которая позволяет определить нижнюю границу вероятности связи в пределах области ЭМС.

Заключение

Полученные результаты аналитического исследования и компьютерного моделирования показали, что переход к построению корпоративных сетей на основе радиосредств, использующих режим с ППРЧ, имеет большие перспективы. Так, по утверждению компании TriSquare [7], надежная связь в режиме с ППРЧ с формированием частотного плана в 50 каналов из 700 возможных, обеспечит устойчивую работу до 100 000 абонентов пользователей в радиусе действия друг друга. В то же время для обычных режимов работы DMO, надежная связь обеспечивается для 20-22 абонентов, при нахождении их в зоне прямой видимости в случае использования совпадающего частотного плана.

Дальнейшие исследования авторы связывают с разработкой методов, направленных на повышение общей помехоустойчивости приема абонентов сети [27]. Другим интересным решением в данной пред-

метной области видится применение методов совместной частотно-временной обработки сигналов, сущность которых раскрыта в [33–35].

Литература

1. Буравков, И. Р. Транкинговые системы связи / И.Р. Буравков // Академическая публицистика. – 2021. – № 4. – С. 30–35.
2. Svrzic, S. M. Description of the TETRA 1 technology and standard for modern digital trunking systems of functional mobile radio communications / S.M. Svrzic, P. Jovanoski // Military Technical Courier. – 2021. – Т. 69, No. 3. – P. 687–726.
3. Степанова, И. В. Проектирование систем радиотелефонной связи стандарта TETRA / И.В. Степанова // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 1. – С. 10–16.
4. Оценка помехозащищенности линий радиосвязи с медленной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / С.В. Дворников, Я.А. Домбровский, М.А. Семисошенко [и др.] // Информация и Космос. – 2016. – № 4. – С. 11–14.
5. Non-cooperative low-complexity detection approach for FHSS-GFSK drone control signals / D. Mototolea, I. Nicolaescu, R. Youssef, E. Radoi // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2020. – Vol. 1. – P. 401–412.
6. Дворников, С. В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты / С.В. Дворников, С.С. Дворников, А.В. Пшеничников // Информационно-управляющие системы. – 2019. – № 4 (101). – С. 62–68.
7. Попов, В. В. Проблемы обеспечения безопасности судоходства путем создания больших морских и портовых систем связи (на примере реализации концепции информационной сети глобальной морской системы связи по безопасности и бедствию Юга России) : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : специальность 05.12.13 "Системы, сети и устройства телекоммуникаций" / Попов Виктор Вениаминович. – Москва, 2000. – 53 с.
8. Лаптев, Д. В. Вероятностная оценка метода совпадения при измерении частоты / Д.В. Лаптев, Ю.А. Пасынков // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 158–162.
9. Дворников, С. В. Оценка помехозащищенности профессионального радионавигационного оборудования системы ГЛОНАСС / С.В. Дворников, О.Г. Духовницкий // Информация и Космос. – 2015. – № 4. – С. 73–77.
10. Назаров, Л. Е. Статистические модели трансионосферных радиолоний с фазовыми замираниями сигналов / Л.Е. Назаров, В.В. Батанов // Радиотехника и электроника. – 2022. – Т. 67, № 11. – С. 1133–1139.
11. Collision properties of GSM hopping sequences / H. Nyberg, S. Craig, S. Magnusson, E. Edgren // The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). – 2000. – P. 1004–1008.
12. Скрынников, В. Г. Особенности оценки условий ЭМС для сетей 5G/IMT-2020 / В.Г. Скрынников, Д.А. Пальцин, Е.Е. Девяткин // Электросвязь. – 2019. – № 5. – С. 22–27.
13. Дворников, С. В. Упрощенное представление модели Neta для расчета затухания сигнала на открытых трассах / С.В. Дворников // Информация и Космос. – 2017. – № 3. – С. 6–10.
14. Макаренко, С. И. Метод обеспечения устойчивости телекоммуникационной сети за счет использования ее топологической избыточности / С.И. Макаренко // Системы управления, связи и безопасности. – 2018. – № 3. – С. 14–30.
15. Войцеховский, С. Н. Интегрированная теория систем о статике и динамике различных систем / С.Н. Войцеховский // Научный обозреватель. – 2015. – № 4 (52). – С. 37–44.
16. Дворников, С. В. Модель деструктивного воздействия когнитивного характера / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников, М.Ю. Аванесов // Информация и Космос. – 2018. – № 2. – С. 22–29.
17. Макаренко, С. И. Моделирование совместного использования ресурсов системы связи методами популяционной динамики / С.И. Макаренко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, № 9. – С. 63–65.
18. Система показателей качества оценивания эффективности процесса функционирования системы связи группировки войск (сил) / В.Г. Иванов, А.И. Астахов, В.С. Сарфанников [и др.] // Стратегическая стабильность. – 2020. – № 3 (92). – С. 46–48.
19. Оценка имитостойкости каналов управления с частотной модуляцией / С.В. Дворников, А.А. Погорелов, М.А. Вознюк, Р.В. Иванов // Информация и Космос. – 2016. – № 1. – С. 32–35.
20. Ушанев, К. В. Показатели своевременности обслуживания трафика в системе массового обслуживания РА/М/1 на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования / К.В. Ушанев, С.И. Макаренко // Системы управления, связи и безопасности. – 2016. – № 1. – С. 42–65.
21. Макаренко, С. И. Описательная модель сети связи специального назначения / С.И. Макаренко // Системы управления, связи и безопасности. – 2017. – № 2. – С. 113–164.
22. Дворников, С. В. Формирование спектрально-эффективных сигнальных конструкций в радиоканалах передачи данных контрольно-измерительных комплексов / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, № 3. – С. 221–228.
23. Кубасов, И. А. Подходы к обоснованию требуемых значений показателей эффективности связи в специальной операции / И.А. Кубасов // Вестник Воронежского института МВД России. – 2020. – № 1. – С. 116–124.
24. Теоретические положения повышения помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций квадратурных сигналов / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников, С.С. Маненко // Информация и Космос. – 2015. – № 3. – С. 13–16.
25. Звонарев, В. В. Методика расчета вероятностей битовых ошибок приема радиосигналов с QPSK-модуляцией при нескольких гармонических помехах / В.В. Звонарев,

А.С. Попов, А.В. Питрин // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 8. – С. 84–95.

26. Земсков, В. И. Развитие подходов к оценке эффективности элементов системы связи Военно-Морского Флота / В.И. Земсков, А.В. Шеремет // Военная мысль. – 2021. – № 3. – С. 73–79.

27. Макаренко, С. И. Модель функционирования объекта сети связи в условиях ограниченной надежности каналов связи / С.И. Макаренко, К.Ю. Рюмшин, Р.Л. Михайлов // Информационные системы и технологии. – 2014. – № 6 (86). – С. 139–147.

28. Дворников, С. В. Моделирование радиотехнических систем в конфликтных ситуациях когнитивного характера / С.В. Дворников, А.Ф. Крячко, А.В. Пшеничников // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы : сборник статей XXII Международной научной конференции. – 2019. – С. 84–89.

29. Макаренко, С. И. Анализ воздействия преднамеренных помех на сетевой уровень модели взаимодействия открытых систем и функционирование протокола маршрутизации оценки состояния канала (OSPF) / С.И. Макаренко // Информационные технологии моделирования и управления. – 2009. – № 7 (59). – С. 956–961.

30. Чубариков, В. Н. Обобщённая формула бинома Ньютона и формулы суммирования / В.Н. Чубариков // Чебышевский сборник. – 2020. – Т. 21, № 4 (76). – С. 270–301.

31. Ананьевский, С. М. О некоторых вероятностных распределениях, связанных с классической схемой Бернулли / С.М. Ананьевский, В.Б. Невзоров // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2022. – Т. 9, № 2. – С. 201–208.

32. Шаров, А. Н. Сети радиосвязи с пакетной передачей информации / А.Н. Шаров, В.А. Степанец, В.И. Комашинский. – Санкт-Петербург : ВАС, 1994. – 216 с.

33. Дворников, С. В. Демодуляция сигналов на основе обработки их модифицированных частотно-временных распределений / С.В. Дворников // Цифровая обработка сигналов. – 2009. – № 2. – С. 7–11.

34. Демодуляция сигналов на основе обработки их модифицированных распределений / С.В. Дворников, А.И. Осадчий, С.С. Дворников, Д.В. Родин // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 10. – С. 46–54.

35. Дворников, С. В. Метод измерения параметров кратковременных сигналов на основе распределения Алексева / С.В. Дворников, А.Ф. Яхеев // Информация и Космос. – 2011. – № 1. – С. 66–74.