

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ПРЕРЫВИСТОЙ СВЯЗИ С РАЗНЕСЕННЫМ ПРИЕМОМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

М. Н. Андрианов

АКЦ ФИАН

Получена 11 июля 2013 г.

Аннотация. Рассматриваются вопросы повышения эффективности передачи данных по беспроводному каналу с замираниями при использовании алгоритма прерывистой связи с разнесенным приемом. Показано оптимальное значение порога и коэффициента использования радиолинии по критерию минимизации вероятности ошибочного приема.

Ключевые слова: прерывистая связь, разнесенный прием, комплексирование, замирания Накагами, коэффициент использования радиолинии, оптимальное значение, вероятность ошибки, помехоустойчивость.

Abstract. Problems of increase of efficiency data transmission on the wireless channel fading with is considered when using algorithm of discontinuous communication with the diversity reception. Optimum value of a threshold and radio line efficiency by criterion of minimization probability of error is shown.

Keywords: discontinuous communication, diversity reception, integration, Nakagami fading, radio line efficiency, optimum value, probably of error, noise immunity.

1. Постановка задачи.

Известны разнообразные способы обработки замирающих сигналов в каналах с замираниями. Наибольший эффект обычно достигается при использовании адаптивных алгоритмов в передающих устройствах. Использование таких алгоритмов целесообразно в том случае, если $2T \ll \tau$, где T – время распространения сигнала по линии связи, τ - интервал корреляции огибающей сигнала во времени. При использовании технологии с временным дуплексом, TDD (Time Divide Duplex), достаточно обеспечить $T \ll \tau$. Среди

известных способов обратим внимание на следующие три: использование автоматической регулировки мощности передатчика (АРМП); регулировка скорости передачи информации в зависимости от уровня сигналов на входах приемников; применение прерывистой передачи сигналов по аналогичному методу, применяемому в системах метеорной связи.

При передаче цифровых данных на значительные расстояния через тропосферные и ионосферные каналы сигнал подвержен различным замираниям. Это объясняется тем, что в точке приема сигнал представляет собой сумму нескольких составляющих $r_i \cdot e^{j\Theta_i}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), проходящих различные пути, причем их амплитуды r_i и фазы Θ_i изменяются во времени случайным образом [1]. Составляющие образуются вследствие расщепления сигнала при прохождении его через дисперсионные среды с различными электрофизическими свойствами. Амплитуда огибающей сигнала (R) в точке приема замирает случайным образом с плотностью вероятности по закону Накагами.

Замирания по закону Накагами испытывают, например, сигналы при дальней тропосферной связи, прошедшие под малым углом к горизонту. Тропосферные линии связи интенсивно исследовались в конце 60-х, начале 70-х годов прошлого века [2, 3]. Затем, в 80-х начале 90-х годов, по мере развития персональной мобильной связи, интерес к ним ослаб.

В дальнейшем, по мере развития систем связи, появилась необходимость осуществлять связь со спутниковым приемопередатчиком не только во время его пролета над земной станцией, но при малых углах к горизонту. В этих условиях обычно возникает замирание сигнала по закону Накагами.

При синтезе прерывистой связи с разнесенным приемом выигрыш относительно разнесенного приема без прерывистой связи будет меньше, чем выигрыш прерывистой связи относительно непрерывной при одиночном приеме. Причем выигрыш этот снижается с увеличением числа ветвей разнесения, поскольку с ростом последних снижается глубина замираний,

интервал корреляции помехи уменьшается, она становится все более похожей на белый гауссов шум. Однако использование прерывистой связи при ограниченном числе ветвей разнесения, обычно применяемое на практике, все же должно приводить к заметному увеличению помехоустойчивости. Кроме того, применение прерывистой связи при разнесенном приеме увеличивает коэффициент использования радиолинии, представляющий собой отношение времени передачи данных в прерывистой связи к общему времени сеанса связи (η_M), что также должно повысить помехоустойчивость приема.

Особенности синтеза прерывистой связи с разнесенным приемом и применение методов прерывистой связи для повышения помехозащищенности передачи дискретных сообщений в каналах с релейскими, обобщенно релейскими, логнормальными замираниями и замираниями по закону Накагами, в режиме TDD, рассмотрены в работах [4-8]. В указанных работах исследуются зависимости вероятности ошибки от среднего отношения сигнал/шум (ОСШ) при комплексировании прерывистой связи с разнесенным приемом, как правило при значении уровня порога (γ_t) равным среднему значению (ОСШ) (γ_0).

Цель работы: снижение вероятности ошибочного приема данных в каналах замираниями по закону Накагами применением синтеза прерывистой связи с разнесенным приемом, с оптимальным сложением ветвей разнесения, в зависимости от уровня порога при фиксированных: мощности передатчика и среднего значения ОСШ.

2. Снижение вероятности ошибочного приема данных при комплексировании прерывистой связи с разнесенным приемом, в каналах с замираниями по закону Накагами в режиме с временным дуплексом (TDD).

В качестве уровня порога определим его нормированное значение (k), как отношение собственно уровня порога (γ_t) к γ_0 (1)

$$k = \frac{\gamma_t}{\gamma_0}. \quad (1)$$

Вероятность ошибки некогерентного приема двухпозиционных фазоманипулированных сигналов (ОФМ-2), при комплексировании прерывистой связи с разнесенным приемом, при оптимальном сложении ветвей разнесения, определится из формулы (2) [7]

$$P(k) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 + \alpha \frac{\gamma_0}{m} \eta_M(k)} \right]^{mM} \frac{\Gamma[mM, km + \alpha \gamma_0 k \eta_M(k)]}{\Gamma(mM, kM)}, \quad (2)$$

где m – параметр замирания, характеризующий глубину замирания Накагами, M – число ветвей разнесения, $\eta_M(k)$ – коэффициент использования радиолинии, показывающий соотношение времени передачи данных к общему времени сеанса связи [4-8], и определяемый формулой [7]

$$\eta_M = \frac{\Gamma(mM, kM)}{\Gamma(mM)}. \quad (3)$$

Зависимости коэффициента использования радиолинии от числа ветвей разнесения M при различных k и m равном 0,7 представлены на рис. 1.

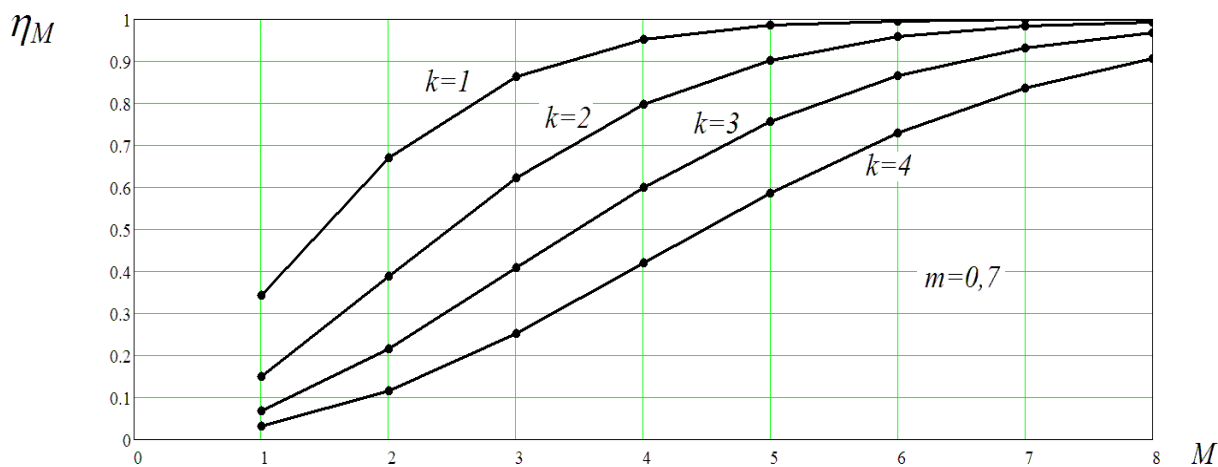


Рис. 1. Зависимости коэффициента использования радиолинии от числа ветвей разнесения M при замираниях по закону Накагами, при различных значениях k и m равном 0,7.

Для обеспечения передачи всего массива данных за сеанс связи необходимо увеличить скорость передачи обратно пропорционально коэффициенту использования радиолинии (η_M), уменьшая при этом длительность информационных бит, и, соответственно расширяя полосу (спектр) сигнала. Из графика на рис. 1 следует, что при увеличении числа ветвей разнесения коэффициент использования радиолинии возрастает, стремясь к 1.

Зависимости вероятности ошибки от значения k (по формуле 2) при фиксированных: мощности передатчика, среднего значения ОСШ на входе приемника (γ_0), m равном 0,7 и M равном 8, когда энергия бита сигнала снижается при уменьшении коэффициента использования радиолинии, представлены на рис. 2.

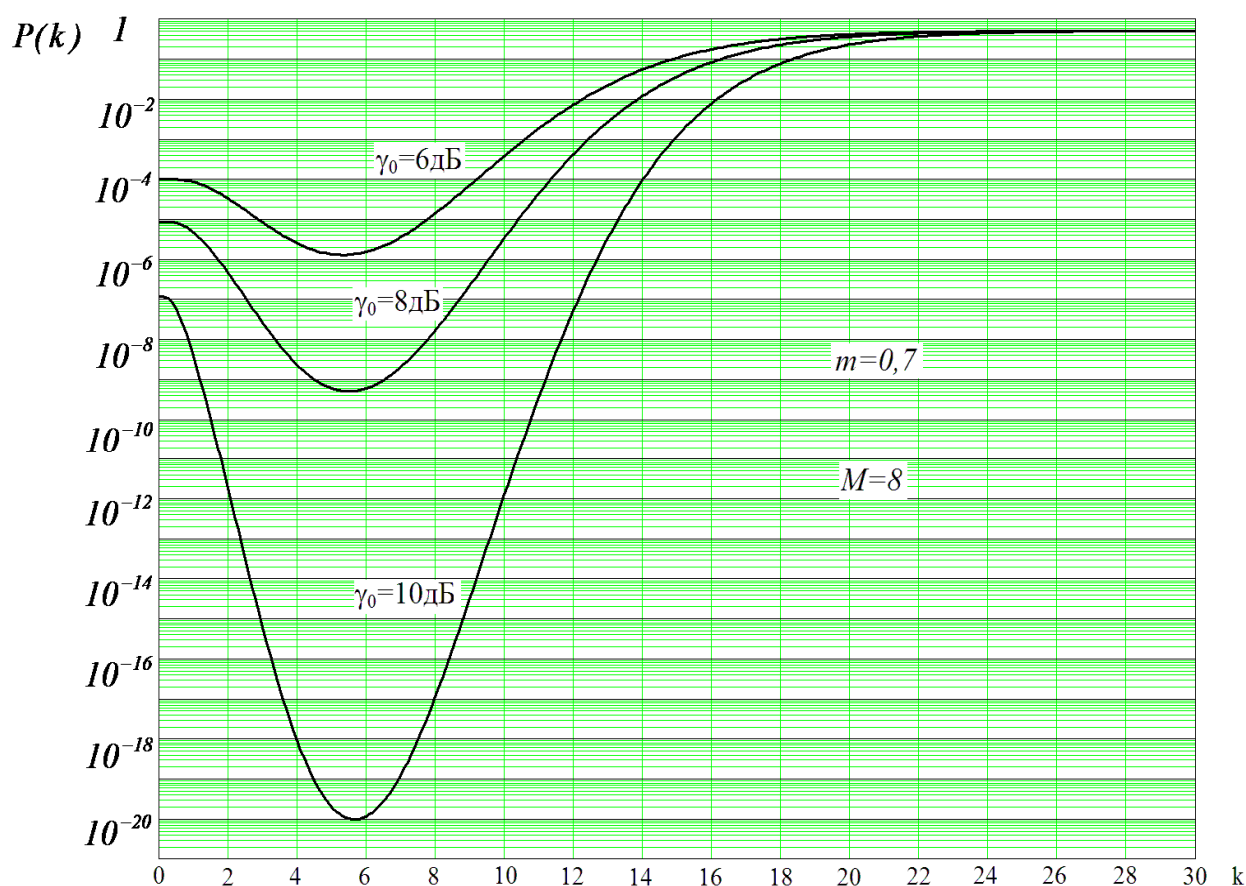


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки некогерентного разнесенного приема сигналов ОФМ-2 при прерывистой связи с оптимальным сложением ветвей разнесения от k при различных средних значениях ОСШ (γ_0), m равном 0,7 и числе ветвей разнесения M равном 8 в канале с замираниями по закону Накагами.

3. Применение синтеза прерывистой связи с разнесенным приемом в системах наземно-космической интерферометрии (проект «Миллиметрон»).

В рамках создания системы наземно-космической интерферометрии с высокоточным разрешением, функционирующей в миллиметровом, субмиллиметровом и инфракрасном диапазоне радиоволн предполагается, что одно из плеч интерферометра будет осуществлять прием сигналов в слабовозмущенной точке Лагранжа (L2), расположенной на расстоянии примерно 1,75 млн. км от Земли. Для передачи принятой информации с бортовой аппаратуры на Землю будет создан высокоинформативный радиотехнический комплекс (ВИРК), который после приема и предварительной обработки данных будет их передавать с космического сегмента на Землю посредством фазоманипулированных сигналов.

При этом, с одной стороны, радиосигналы будут проходить сквозь слой тропосферы, толщиной от 8 до 18 км в зависимости от широты местности, с другой стороны, расстояние от Земли до точки Лагранжа радиосигнал преодолевает за время примерно 6 с, что значительно превышает интервал корреляции огибающей сигнала. Условие, при котором $T \ll \tau$ не выполняется. Поэтому корреляция уровней сигналов на выходе передатчика и входе приемника, в режиме TDD, реализуемая при небольших (до сотен км) расстояниях, в этом случае не возможна.

Для устранения указанного недостатка необходимо передавать данные с повышенной скоростью, без прерывистой связи, обратно пропорционально η_M , предварительно записав их в буферную память. В этом случае сигнал будет приниматься не только в периоды, когда мгновенное значение ОСШ (γ) превышает уровень порога (γ_t), но и в периоды глубоких замираний, существенно снижая помехоустойчивость, повышая при этом вероятность ошибки, которая будет определяться согласно (4)

$$P(k) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 + \alpha \frac{\gamma_0}{m} \eta_M(k)} \right]^{mM} \quad (4)$$

Зависимости вероятности ошибки от значения k (по формуле 4) (кривая 1) при фиксированных мощностях передатчика, среднего значения ОСШ на входе приемника (γ_0), m равном 0,7 и M равном 8 в сравнении с вероятностью ошибки по формуле 2 (кривая 2) представлены на рис. 3.

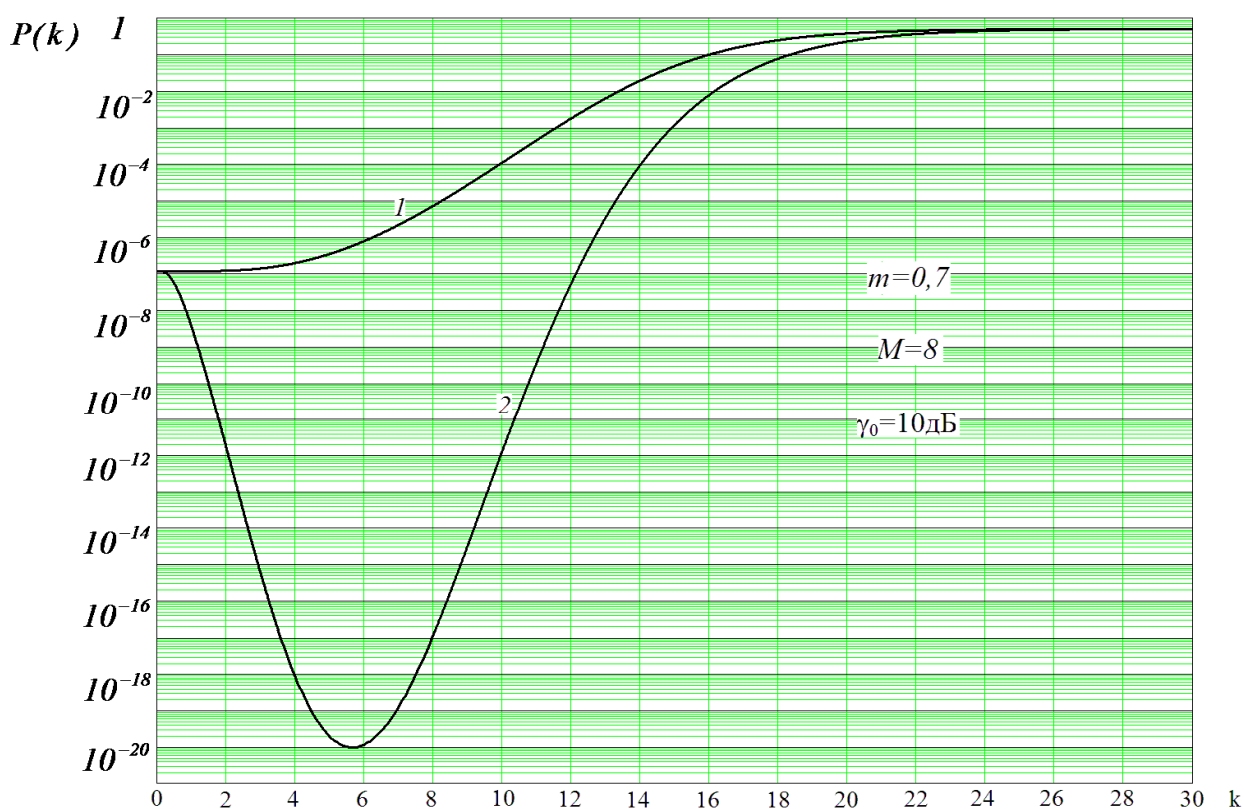


Рис. 3. Вероятности ошибок при разнесенном приеме сигнала ОФМ-2 с оптимальным сложением ветвей разнесения без прерывания (кривая 1) и при синтезе прерывистой связи с разнесенным приемом с оптимальным сложением ветвей разнесения (кривая 2).

Анализируя принятые данные (например, с использованием CRC-кодов) можно определить те участки времени приема данных, при которых было значительное число ошибок, и, тем самым определить те моменты времени, при которых ослабление (замирание) сигнала было значительным. Используя обратный канал можно передать необходимые команды для повторной

передачи некачественных данных. Повышенная скорость передачи (обратно пропорционально η_M) позволяет это реализовать без потери информации.

Выбирая значения k при учете коэффициента использования радиолинии (η_M) и вероятности ошибки (соответственно рис. 1 и рис. 2, 3) можно осуществить передачу данных с низкой вероятностью ошибки при незначительном расширении полосы сигнала.

Применение технологии ортогонального частотного мультиплексирования [6, 7, 9] (OFDM- **O**rt**H**ogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiplexing) наряду с повышением спектральной эффективности, возможностью адаптивно управлять частотным ресурсом, позволяет эффективно бороться с межсимвольной интерференцией.

Выводы

1. Для канала с замиранием сигнала по закону Накагами синтезом прерывистой связи с разнесенным приемом, с оптимальным сложением ветвей разнесения, получено аналитическое выражение вероятности ошибки в зависимости от уровня порога при фиксированных: мощности передатчика и среднего значения ОСШ. Показано его оптимальное значение.
2. Показана возможность осуществления реализации помехоустойчивой и спектрально эффективной передачи данных в наземно-космической интерферометрии (в рамках проекта «Миллиметрон») комплексированием прерывистой связи с разнесенным приемом, при оптимальном сложении ветвей разнесения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тихонов В.И.** Статистическая радиотехника. 2-е изд. пер. и доп. – М.: Советское радио, 1966. – 678 с.
2. **Гусятинский И.А.** Дальняя тропосферная связь. – М.: Связь, 1968.

3. **Гусятинский И.А., Немировский А.С., Соколов А.В., Троицкий В.Н.** Дальняя тропосферная радиосвязь. – М.: Связь, 1968.
4. **Андрианов М.Н., Киселев И.Г.** Вероятность ошибки в каналах со случайными параметрами при комплексировании прерывистой передачи и разнесенного приема // М., Мобильные системы. – 2007. – №5. – С. 44-47.
5. **Андрианов М. Н.** Повышение помехоустойчивости подвижной связи в канале с логнормальными замираниями комплексированием прерывистой связи с разнесенным приемом сигналов // Электромагнитные волны и электронные системы, Т.14, №7, 2009, с. 11-17.
6. **Шахтарин Б.И., Андрианов М.Н., Андрианов И.М.** Применение прерывистой связи с каналах со случайными параметрами для передачи сигналов узкополосных и с ортогональным частотным разделением // Радиотехника и электроника – 2009г, т. 54, №10, с. 1237-1244.
7. **Андрианов И.М.** «Разработка алгоритмов повышения эффективности систем с ортогональным частотным уплотнением и прерывистой передачей данных»: Диссертация на соискании ученой степени кандидата технических наук. – М., 2012.
8. **Андрианов М.Н., Бумагин А. В., Киселев И.Г., Руткевич А.В., Стешенко В.Б., Шишкин Г.В.** Анализ и синтез прерывистой связи с разнесенным приемом для повышения эффективности передачи дискретных сообщений. 12-я Международная конференция “Цифровая обработка сигналов и ее применение.” 31 марта – 2 апреля 2010 г., г. Москва с. 82-85.
9. **Richard V.N., Prosad R.** OFDM for Wireless Multimedia Communications. – London, Artech House, 2000. – pp. 280.