

УДК 621.391.1

НИЗКОЧАСТОТНЫЙ РАДИОТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИЙ КАНАЛ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПРИЕМНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ И ОРТОГОНАЛЬНОГО ЧАСТОТНОГО МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ

© 2011 Г.И. Леонович¹, М.С. Сорокин², А.Ф. Крутов³

¹ Самарский научный центр РАН

² ФГУП “НИИ “Экран”, г. Самара

³ Самарский государственный университет

Поступила в редакцию 05.04.2011

Исследована модель низкочастотного узкополосного радиотелеметрического канала на основе двухкоординатной пространственно распределенной приемной антенной системы и ортогонального частотного мультиплексирования М-КАМ модулированных сигналов. Проведена оценка параметров радиоканала при воздействии помех для различной размерности матрицы приемных антенн. Ключевые слова: низкочастотный радиотелеметрический канал, пространственно распределенная приемная антенная система.

ВВЕДЕНИЕ

Узкополосные РТС в СДВ, ДВ и СВ диапазонах из-за особенностей радиоканала нашли широкое применение в основном в профессиональной и любительской радиосвязи. В частности, последние достижения в области цифровой обработки сигнала связаны с появлением таких систем передачи информации, как профессиональная система “Подземное радио” (UWC), любительская система “Медленный телеграф” (QRSS) [1-3]. Современные НЧ РТС характеризуются: применением новых типов антенных систем, использованием эффективных сигнально-кодовых конструкций, методов мультиплексирования, кодирования и сжатия информации с целью повышения качества приема и увеличения пропускной способности.

В представленной статье предложен вариант построения и проведен анализ модели узкополосной системы передачи телеметрических данных от удаленных стационарных или малоподвижных источников, имеющей улучшенные показатели вероятности битовых ошибок в ДВ диапазоне за счет применения модифицированной антенной системы SIMO (Single Input – Multiple Output, одна передающая – множество приемных) и ортогонального частотного мультиплексирования (ОЧМ).

Леонович Георгий Иванович, доктор технических наук, профессор, начальник Поволжского отделения Секции прикладных проблем при Президиуме РАН. Тел. (846) 334-48-10, 242-10-90.

Сорокин Михаил Сергеевич, инженер систем и технологий. Крутов Александр Федорович, доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе, профессор кафедры общей и теоретической физики.

РАДИОКАНАЛ С АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ SISO ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ М-КАМ ОЧМ СИГНАЛА

Антенная система SISO (Single Output - Multiple Input) содержит одну передающую и одну приемную антенны. На передающей стороне поток битов преобразуется в символы, которые используются для квадратурной амплитудной модуляции (КАМ) N поднесущих (рис. 1).

Формирование суммарного КАМ-ОЧМ сигнала осуществляется посредством базисных тригонометрических функций из потока N цифровых символов длительностью T_s в соответствии с алгоритмом обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) [4, 5]:

$$s(t) = \text{Re} \left\{ e^{j2\pi f_0 t} \sum_{k=0}^{N-1} [I(k) + jQ(k)] e^{j2\pi k \Delta f t} \right\}, \quad (1)$$

где f_0 – несущая частота; k – индекс поднесущей; $\Delta f = 1/T_s$ – частотный разнос поднесущих; $I(k)$, $Q(k)$ – квадратурная и синфазная составляющие k -й поднесущей; $0 < t < T_s$.

В модели радиоканала охранные интервалы можно не использовать, так как для низкодиа-

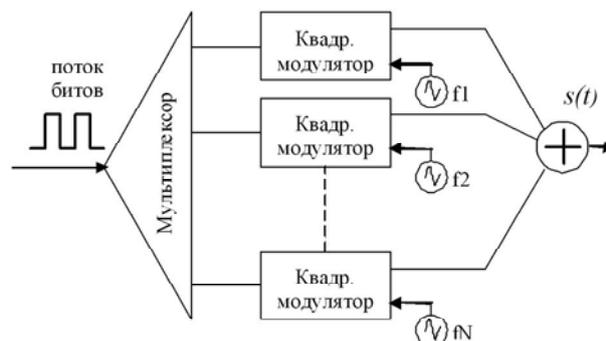


Рис. 1. Схема формирования суммарного выходного сигнала

пазонных узкополосных сигналов (ДВ и нижний поддиапазон СВ) при малоподвижных передатчиках влияние межсимвольных помех незначительно. Существенно большее влияние оказывают мультипликативные и аддитивные шумовые помехи [6].

В приемнике для восстановления данных производится сглаживание, оцифровка и прямое дискретное преобразование Фурье (ПДФ) суммарного сигнала с последующим параллельным пороговым определением значений символов, которые в процессе демодуляции переводятся в последовательность битов.

В результате алгоритмической обработки из принятого суммарного сигнала выделяются квадратурные и синфазные составляющие сигналов поднесущих [4]

$$I^*(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left[I^*(n) \cos\left(\frac{-2\pi k \Delta f n}{N}\right) - Q^*(n) \sin\left(\frac{-2\pi k \Delta f n}{N}\right) \right], \quad (2)$$

$$Q^*(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left[Q^*(n) \cos\left(\frac{-2\pi k \Delta f n}{N}\right) + I^*(n) \sin\left(\frac{-2\pi k \Delta f n}{N}\right) \right], \quad (3)$$

где $I^*(n), Q^*(n)$ – квадратурная и синфазная составляющие суммарного сигнала с учетом помех, отсчитанные по дискретной шкале времени; n – номер временного отсчета.

Качество восстановления символов определяется отношением сигнал/шум (ОСШ), которое согласно [7] примем как $SNR = 1 / EVM^2$, где EVM – евклидово расстояние между координатами идеального и реально измеренного символов, равное

$$EVM(k) = \sqrt{\frac{(I(k) - I_*(k))^2 + (Q(k) - Q_*(k))^2}{I^2(k) + Q^2(k)}}. \quad (4)$$

Вероятность символьной ошибки для многопозиционной М-КАМ модуляции равна [7]:

$$P_s(k) = 1 - \left[1 - 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{\sqrt{3SNR(k)}}{\sqrt{M-1}}}^{\infty} e^{-t^2} dt \right) \right]^2, \quad (5)$$

где M – алфавит многопозиционного модулированного сигнала М-КАМ; SNR – ОСШ, усредненное по ансамблю траекторий символов одной поднесущей.

Вероятность битовой ошибки в k -м частотном канале определяется как

$$BER_k = P_b(k) = \frac{2^{n-1}}{2^n - 1} P_s(k), \quad (6)$$

где $n = \log_2 M$.

ДВУХКООРДИНАТНАЯ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ПРИЕМНАЯ АНТЕННАЯ СИСТЕМА

При распространении низкочастотного сигнала уровень принимаемой мощности является случайной функцией, зависящей от местоположения абонентов, времени и замираний сигнала. На каждый луч воздействуют мультипликативные и аддитивные помехи, уровень которых может варьироваться в широком диапазоне [4-6, 8].

Применение пространственно разнесенных приемных антенн является одним из эффективных способов повышения помехоустойчивости. Система SIMO реализует механизм пространственно-временной обработки сигналов группой независимых интеллектуальных антенн и приемников. В большинстве беспроводных сетей используют простую коммутацию, чтобы по мажоритарному принципу выбрать антенну с лучшим отношением сигнал/шум [4, 5].

Предложенная двухкоординатная матрица из $B = b_x \times b_y$ приемных антенн, расположенных с шагом $l_x = (0,001 \dots 0,01) \lambda$ по оси x и с шагом $l_y = (2 \dots 10) \lambda$ по оси y , является составной частью модифицированной системы SIMO (рис. 2).

Система дает возможность многократно идентифицировать принимаемый КАМ-ОЧМ сигнал в предельно узком интервале времени $\Delta t \approx (b_x - 1) T_x / c$ с целью эффективного выделения символов на фоне помех [9].

Например, при $b_y = b_x = 3$ и $l_x = 0,005 \lambda$ параметры k -й поднесущей (k -го символа) на первом этапе определяются по трем отсчетам по координате x , выполненным в моменты времени t_1 ,

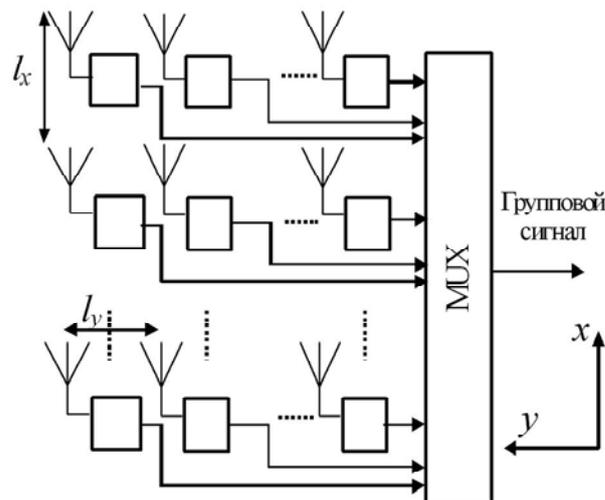


Рис. 2. Структурная схема двухкоординатной SIMO

$t_2 = t_1 + \Delta t/2$, $t_2 = t_1 + \Delta t$ в пределах сотой доли периода поднесущей. Дальнейшая обработка сигналов по координате y осуществляется по стандартному алгоритму. При этом для сбора данных с удаленных приемников используется, например, УКВ диапазон или ВОЛС. В результате для принятия системой решения о значении символа достаточно периода поднесущей. Возможны и другие варианты сбора и обработки принятых сигналов.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО РАДИОКАНАЛА SIMO – ОЧМ – М-КАМ

Оценка эффективности модифицированной системы SIMO – ОЧМ – М-КАМ проводилась с применением имитационного моделирования. Задавался псевдослучайный аддитивный и мультипликативный помеховый сигнал, воздействующий на систему из $V = b_x \times b_y$ антенн с приближающейся точки, при этом учитывался пространственно-временной сдвиг сигнала и воздействующей помехи. По результатам моделирования строилось сигнальное созвездие (рис. 3).

Далее на основе формулы (4) определяется усредненное значение $EVM(k)$ по V измерениям, после чего по формулам (5) и (6) вычисляются значения символьной и битовой ошибок на частотном канале с наилучшим ОСШ.

На рис. 4 отображены зависимости вероятности битовой ошибки от ОСШ для матриц приемных антенн различной размерности ($b_x = b_y$). Из характера изменения кривых видно, что с увеличением количества антенн BER резко уменьшается при высоком уровне помех. Как показывает анализ сигнальных созвездий, наиболее суще-

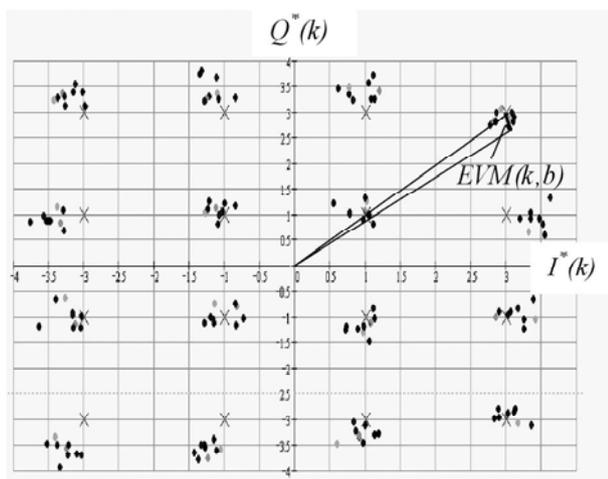


Рис. 3. 16-КАМ созвездие, полученное при имитации белого шума, воздействующего на матрицу антенн 3×3

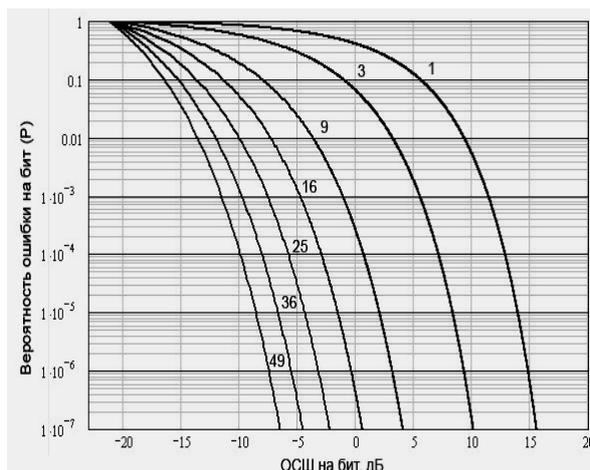


Рис. 4. Зависимость BER от ОСШ при $V=1, 3, 9, 16, 25, 36, 49$

ственный выигрыш достигается за счет линейки b_y , если источник помех находится на оси y .

В процессе исследования было выявлено максимальное влияние даже малой помехи на первую поднесущую ОЧМ символа, что обусловлено особенностями ОБПФ. Поэтому целесообразно не использовать первую поднесущую в качестве информационной составляющей сигнала. Тогда, например, при 16-КАМ, полосе символа $(N-1) \Delta f = 1$ кГц и расстоянии между поднесущими $\Delta f = 2$ Гц спектральная эффективность составляет 3,992 бит/с/Гц.

Пропускная способность SIMO – ОЧМ – М-КАМ радиоканала определяется по формуле

$$C = \sum_{k=0}^{N-1} v \left(\log_2 M + P(k) \log_2 \left(\frac{P(k)}{M-1} \right) + (1 - P(k)) \log_2 (1 - P(k)) \right), \quad (7)$$

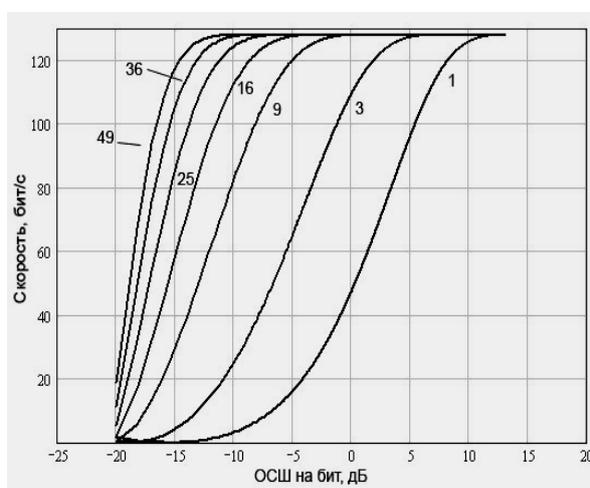


Рис. 5 Зависимость скорости передачи от ОСШ при $V=1, 3, 9, 16, 25, 36$ и 49 ; $N=16$; $M=16$; $\Delta f=2$ Гц

где $k=0\dots N-1$, N – количество символов; M – алфавит М-КАМ.

Соответственно с ростом B и увеличением ОСШ пропускная способность стремится к предельному значению, что позволяет применить модуляцию с $M=64, 128, 256$ и более (рис. 5). Использование адаптивной модуляции дает возможность варьировать скорость передачи данных в широких пределах, обеспечивая прием телеметрических данных с BER= $10^{-6}\dots 10^{-9}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методов многократной идентификации ОЧМ – М-КАМ сигнала в предельно узком интервале времени посредством модифицированной системы SIMO позволяет существенно уменьшить вероятность символьных и битовых ошибок при воздействии различных видов помех, характерных для низкочастотного диапазона. Это создает перспективы для разработки РТМС для стационарных и малоподвижных источников данных, устойчиво функционирующих на длинных и средних волнах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leaders in Through-The-Earth Communication. URL: <http://www.vitalalert.com>
2. Радиосвязь в режиме QRSS. URL: <http://www.ruqrz.com/?p=1973> (дата обращения 15.03.2011).
3. MIMO Formats – SISO, SIMO, SIMO, MU-MIMO. URL: <http://www.globalspec.com> (дата обращения 15.03.2011).
4. Вишневецкий В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005.
5. Леонович Г.И., Логвинов Л.М. Космические и наземные системы радиосвязи и сети теле-радиовещания. Самара: Самарский научный центр РАН, 2008.
6. Помехи и распространение радиоволн. URL: <http://6p3s.ru/qrn.php> (дата обращения 15.03.2011).
7. Ньюман Э. Оптимизация приемника при помощи анализа модуля вектора ошибки // Беспроводные технологии. 2007. №4. С. 57-60.
8. Защита от радиопомех. [под ред. Максимова М.В.]. М.: Советское радио, 1976.
9. Мелентьев В.С., Батищев В.И., Леонович Г.И. Метод определения амплитудного значения гармонического сигнала по ортогональным составляющим // Тр. 6 Всеросс. научн. конф. с междуна. уч. Часть 4. Информационные технологии в математическом моделировании. Самара: СамГТУ, 2009. С. 95–98.

LOW-FREQUENCY RADIO TELEMETRY CHANNEL ON THE BASIS OF SPATIALLY DISTRIBUTED RECEIVING ANTENNA SYSTEM AND ORTHOGONAL FREQUENCY-DIVISION MULTIPLEXING

© 2011 G.I. Leonovich¹, M.S. Sorokin², A. F. Krutov³

¹Samara Scientific Centre of Russian Academy of Sciences

²FSUE “NII “Ecran”, Samara

³Samara State University

The model of the low-frequency radio telemetry channel on the basis of two-dimensional spatially distributed receiving antenna system and orthogonal frequency-division multiplexing of m-QAM signals is investigated. Quality estimation of the radio channel parameters by influence of the noises is performed carried out for various array dimensions of the receiving antennas.

Key words: low-frequency radio telemetry channel, two-dimensional spatially distributed receiving antenna system

*Georgy Leonovich, Doctor of Technics, Professor, Chief of Volga Region Branch of Section of Applied Problems at Presidium of the Russian Academy of Sciences.
Tel. (846) 334-48-10, 242-10-90.*

*Mikhail Sorokin, Engineer of Systems and Technologies
Alexander Krutov, Doctor of Physics and Mathematics,
Professor, Vice-Rector on Scientific Work, Professor at the General and Theoretical Physics Department*