

Методы зондирования радиоканала MIMO

А. А. Калачиков, Н. С. Щелкунов

Приведён обзор методов, позволяющих проводить канальное зондирование (channel sounding) для телекоммуникационных систем MIMO с несколькими передающими и несколькими приёмными антеннами.

Ключевые слова: MIMO, канальное зондирование, импульсная характеристика, частотная характеристика.

1. Введение

В современных телекоммуникационных системах связи в настоящее время применяются технологии для повышения скорости передачи данных и эффективности использования частотного спектра. Одной из технологий для повышения пропускной способности является технология MIMO, где применяется несколько антенн на передающей и приёмной стороне. Повышение пропускной способности зависит от условий распространения сигнала и статистических свойств радиоканала MIMO. Для экспериментальной проверки этих условий в настоящее время широко и активно проводятся исследования и измерения в различных частотных диапазонах, различных условиях распространения сигнала и различных конфигурациях антенн [1, 3, 5].

В данной статье рассматриваются методы измерения радиоканала MIMO и его основные характеристики.

2. Основные характеристики канала MIMO

Канал MIMO (Multiple Input – Multiple Output) в радиосистемах образуется при применении m антенн на передающей и n – на приёмной стороне (рис. 1).

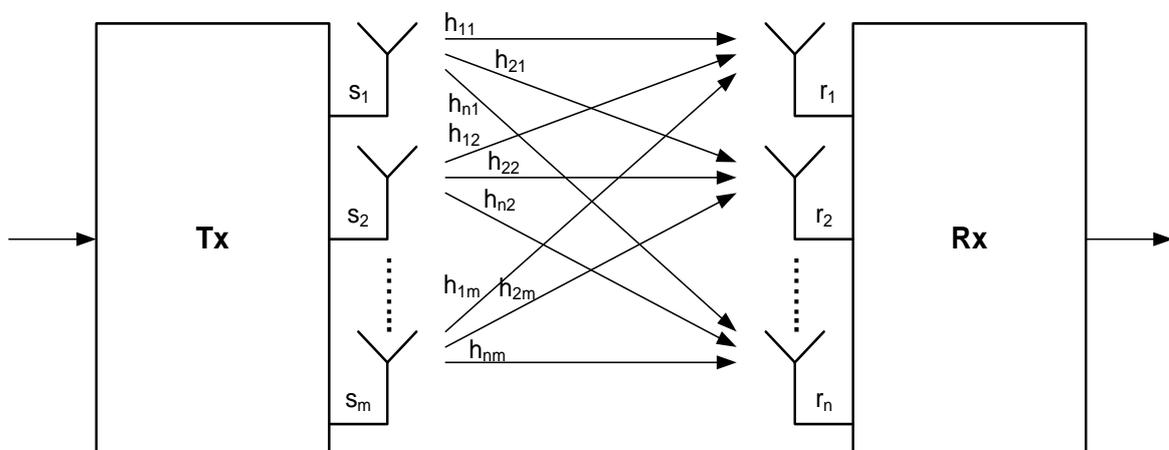


Рис. 1. Общая структура канала MIMO

Входной сигнал систем связи MIMO преобразуется по правилу:



Рис. 2. Общий принцип зондирования канала

Передатчик излучает зондирующий радиосигнал, приёмник принимает и сохраняет сигнал на выходе радиоканала. После этого осуществляется вычисление импульсной характеристики канала или передаточной характеристики канала по известному сигналу для зондирования и принятому сигналу. Сигнал, который излучается передатчиком, состоит из периодически повторяемых импульсов $p(t)$ и его можно записать в виде [3]:

$$S(t) = \sum_{i=1}^N p(t - iT), \quad (6)$$

где T – период повторения передаваемых импульсов. Каждое измерение будет состоять из N зондирующих импульсов, передаваемых через определенный интервал. Зондирующие импульсы в данном случае являются сверткой базовых импульсов $S(t)$, формируемых генератором и импульсной характеристикой фильтра передатчика $g(t)$:

$$p(t) = S(t) * g(t). \quad (7)$$

Вид зондирующего сигнала зависит от типа зондирующего устройства.

Для обеспечения точности проведения измерений необходимо выполнять ряд следующих требований для используемого зондирующего сигнала:

- 1) для повышения разрешающей способности во времени необходимо применение сигналов, обладающих большой шириной спектра;
- 2) длительность сигнала не должна быть больше интервала когерентности канала, т.е. времени, в течение которого канал остаётся постоянным. После начального зондирующего импульса следующий зондирующий импульс должен быть излучён после того, как полностью затухнет импульсная реакция канала;
- 3) спектр зондирующего сигнала должен быть равномерным во всей полосе зондирующего канала (пример на рис. 3) [5]. Это позволяет провести оценку радиоканала ММО на всех частотах с одинаковым качеством;
- 4) небольшой крест-фактор излучаемого сигнала – условие для эффективного использования мощности передатчика;
- 5) хорошие корреляционные свойства зондирующего сигнала. Автокорреляционная функция зондирующего сигнала должна обладать большим отношением пикового значения уровня боковых лепестков. Данное условие является необходимым при проведении зондирования радиоканала ММО во временной области.

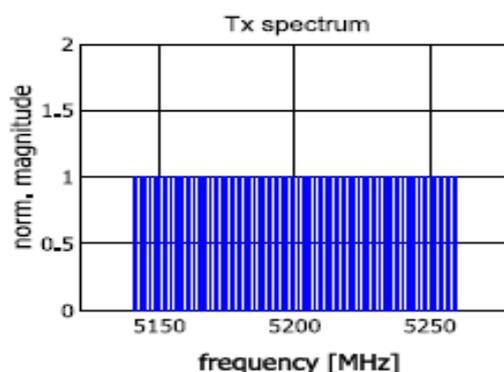


Рис. 3. Пример спектра зондирующего сигнала

Для обеспечения точности измерения радиоканала ММО необходима синхронизация передатчика и приёмника измерительной установки для зондирования канала. Для обеспечения синхронизации применяются следующие методы:

- 1) синхронизация по кабельному соединению; данный метод используют при проведении измерений внутри помещений;
- 2) синхронизация по принимаемому сигналу; простой способ, но подвержен большому влиянию помех и искажений в канале, имеет низкую точность;
- 3) синхронизация по сигналам GPS; приёмники GPS позволяют использовать стандартные сигналы PPS или 10 МГц в качестве опорных сигналов для синхронизации;
- 4) использование высокостабильных опорных генераторов, например, на основе рубидия. Рубидиевые генераторы синхронизируются на начальном этапе перед проведением измерений и сохраняют высокую стабильность частоты 10^{-11} в течение нескольких часов.

Для проведения зондирования радиоканала ММО используются методы измерения во временной области и измерения в частотной области.

Методы зондирования радиоканала ММО во временной области позволяют проводить измерение импульсной характеристики канала. Принцип импульсного зондирования представлен на рис. 4 [4].

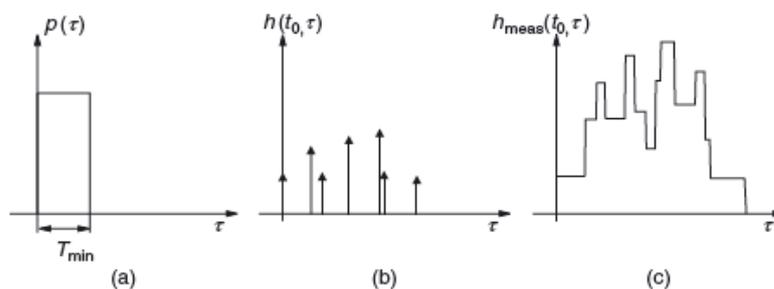


Рис. 4. Принцип импульсного зондирования:
 а) передаваемый импульс, б) импульсный отклик прибора,
 с) измеренная импульсная характеристика

Импульсная характеристика измерительного прибора должна приближаться к дельта-функции, что минимизирует влияние параметров системы на измеряемую импульсную характеристику радиоканала ММО. Если это условие не выполняется, тогда производят удаление импульсной характеристики измерительного прибора из результатов измерения. На практике в качестве зондирующих сигналов выбирают последовательности максимальной длины (М-последовательности) или ЛЧМ-сигналы. В качестве средств измерений на передающей стороне можно использовать векторные генераторы сигналов, на приёмной стороне – цифровые осциллографы [6].

Измерение импульсных характеристик канала можно проводить по корреляционному принципу. На передающей стороне формируется тестовый псевдослучайный сигнал с хорошими корреляционными свойствами. Принятый сигнал в виде квадратурных отсчётов сворачивается с переданным сигналом, в результате чего вычисляется комплексная импульсная характеристика канала. На рис. 5 приведён пример измеренной авторами импульсной характеристики канала ММО 2x2 в условиях распространения внутри помещения.

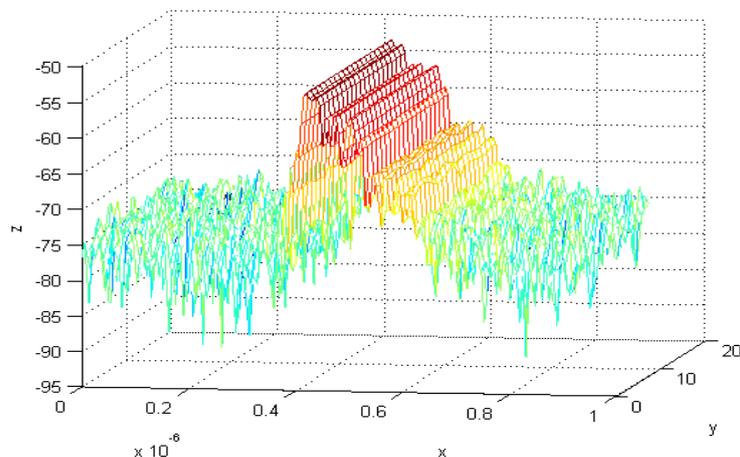


Рис. 5. Импульсная характеристика радиоканала ММО 2x2

Методы зондирования радиоканала ММО в частотной области позволяют проводить измерение передаточной характеристики канала. Основным критерий зондирующего сигнала – это постоянный уровень спектра мощности сигнала во всём измеряемом диапазоне. Как пример такого измерительного комплекса, в котором используется данный принцип, – RUSK ATM с центральной частотой спектра 2.4 ГГц или 5.2 ГГц, с шириной полосы зондирующего сигнала 120 МГц или 200 МГц [5]. Частоты и фазы отдельных гармонических составляющих подобраны таким образом, что в целом они дают прямоугольную форму спектра. Спектр зондирующего сигнала и временная форма для RUSK ATM показаны на рис. 6 [5].

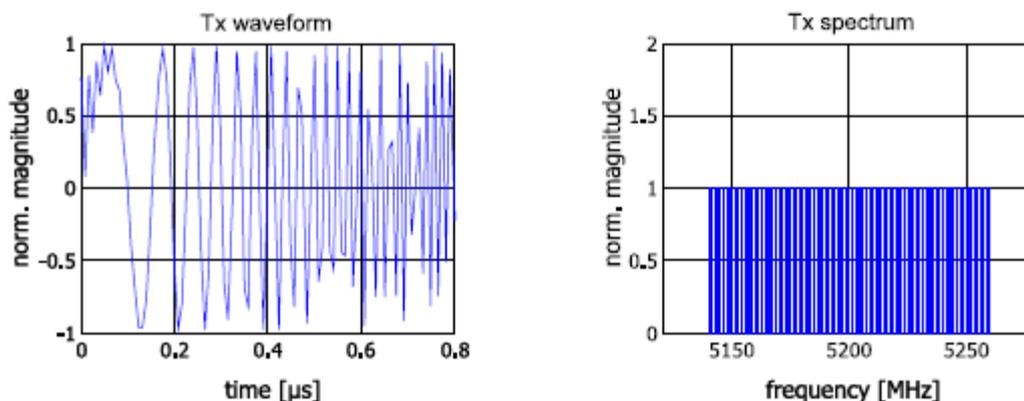


Рис. 6. Временная форма и спектр зондирующего сигнала RUSK ATM

Для проведения зондирования радиоканала ММО применяется коммутация СВЧ сигналов по передающим и приёмным антеннам (рис. 7).

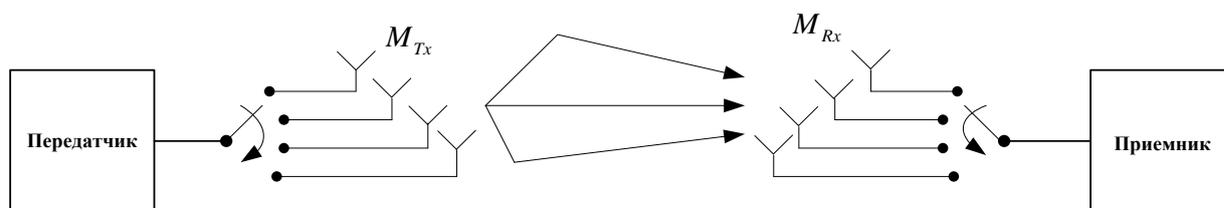


Рис. 7. Схема коммутации СВЧ антенн

В результате проведения канального зондирования получают многомерную структуру, описывающую частотные характеристики всех каналов измерения. При помощи обратного преобразования Фурье затем производится вычисление импульсной характеристики измеряемых каналов.

С помощью векторных анализаторов цепей также можно проводить измерение радиоканала MIMO [2]. В качестве измеряемого устройства выступает радиоканал, для которого измеряется параметр S_{21} – передаточная характеристика канала на текущей частоте измерения. Для уменьшения влияния векторных анализаторов цепей применяется калибровка. Ограничением данного метода является то, что возможны измерения радиоканалов внутри помещений и для каналов, которые медленно изменяют свои параметры, так как измерения выполняются последовательно по всему частотному диапазону.

4. Заключение

Данная статья посвящена обзору основных характеристик канала MIMO и методам канального зондирования (channel sounding) для телекоммуникационных систем связи с несколькими передающими и несколькими приёмными антеннами. Приведены общие требования к измерительным системам.

Литература

1. V.-M. Kolmonen, J. Kivinen, L. Vuokko, and P. Vainikainen 5.3-GHz MIMO Radio channel sounder // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2006. V. 55, № 4, P. 1263-1269.
2. Jose-Maria Molina-Garcia-Pardo, Jose-Victor Rodriguez, Leonardo Juan-Llacer MIMO Channel Sounder Based on Two Network Analyzers // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. 2008. V. 57, №9, P. 2052-2058.
3. Neson Costa, Simon Haykin, MULTIPLE-INPUT MULTIPLE-OUTPUT CHANNEL MODELS: Theory and Practice, John Wiley & Sons Ltd, 2010, 225 p.
4. Molisch, Andreas F., Wireless Communications, 2 ed, Wiley – IEEE, 2011, 844 p.
5. RUSK channel sounder.
URL: <http://www.channelsounder.de/ruskchannelsounder.html>, (дата обращения 03.05.2015).
6. C. Garcia-Pardo, J.M.M.G. Pardo, J. Rodriguez, and L. Juan-Llacer Comparison between Time and Frequency Domain MIMO Channel Sounders // in Proc. VTC Fall. 2010. P.1-5.

Статья поступила в редакцию 25.05.2015;
переработанный вариант – 23.06.2015

Калачиков Александр Александрович

к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, тел. (383) 2-698-267, e-mail: diff32@rambler.ru.

Щелкунов Николай Сергеевич

аспирант кафедры радиотехнических систем СибГУТИ, тел. (383) 2-698-267, e-mail: shns@ngs.ru.

Methods of MIMO radio channel sounding

A. A. Kalachikov, N. S. Shchelkunov

In this article, a review of methods enabling channel sounding for MIMO telecommunication systems with several transmitting and receiving antennas is presented.

Keywords: MIMO, channel sounding radio channel MIMO, impulse response, frequency response.