

# Анализ помех в жгуте перчатки костюма телеприсутствия

Б. М. Антипин

Санкт Петербургский государственный  
университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

E-mail boris\_antipin@mail.ru

Е. М. Виноградов

Санкт Петербургский государственный  
университет телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

E-mail vinog1936@mail.ru

**Аннотация.** Костюм телеприсутствия используется для управления работой робота-аватара в удаленном или виртуальном пространстве. Важным элементом костюма является перчатка, имитирующая работу ладони человека, движение ее пальцев. Сигналы управления работой пальцев ладони руки аватара, передаваемые от костюма робота через пространство посредством беспроводной локальной сети WiFi, формируются непосредственно в костюме телеприсутствия. Сигналы управления работой перчатки и сигналы, передаваемые посредством WiFi, поступают по проводам, размещенным в одном жгуте. Между проводами возникают помехи, которые могут приводить к искажениям передаваемых сигналов и сбоям в работе регулируемого объекта. Работа связана с анализом уровней возникающих помех и оценкой степени их опасности.

**Ключевые слова:** костюм телеприсутствия, перчатка костюма, электрические помехи, магнитные помехи, ряды Фурье

## I. ВВЕДЕНИЕ

Костюм телеприсутствия – это устройство в виде экзоскелета, которое позволяет оператору управлять роботом в удаленном или виртуальном пространстве. Основными элементами, осуществляющими управление, являются микроконтроллеры. Они выполняют функции обмена данными о положении частей тела пользователя костюмом и виртуального объекта, формируют команды о необходимых изменениях в этих положениях и сообщают о результатах выполнения переданных команд. Места расположения датчиков и микроконтроллеров разнесены, и связь между ними осуществляется с помощью проводов, объединенных в жгуты. Если провода в жгутах не экранированы, что имеет место в большинстве случаев, то могут возникнуть внутренние помехи радиоэлектронным элементам костюма из-за наводок от сигналов в близко расположенных проводах. Провода выступают в качестве антенн и в жгуте располагаются в зоне индукции друг друга. В этой зоне практически отсутствует излучение электромагнитной энергии, а электрические и магнитные поля, создаваемые токами, протекающими по этим проводам и связанные с ними помехи, оцениваются отдельно. Важным элементом костюма является перчатка, которая задает движения пальцев руки управляемого объекта. Жгут перчатки содержит 16 проводов. Среди них находятся 4 провода, которые участвуют в формировании аналогового сигнала, несущего информацию о движении пальцев руки, с последующей передачей сигнала роботу по WiFi для реализации передаваемых им движений. В этом

пучке проводов могут возникать помехи, искажающие формируемый сигнал.

Цель данной работы состоит в том, чтобы рассмотреть один из возможных путей оценки уровней возникающих помех и их влияния на качество сигнала перчатки, сформированного для передачи управляемому объекту.

## II. СИГНАЛЫ, ПЕРЕДАВАЕМЫЕ ПО ПРОВОДАМ

На рис. 1 приведена упрощенная структурная схема управления пальцами ладони в перчатке.

Жгут, связывающий датчики движения пальцев с мультиплексором MUX-8, содержит до входа в мультиплексор 5 проводов по числу пальцев на руке.

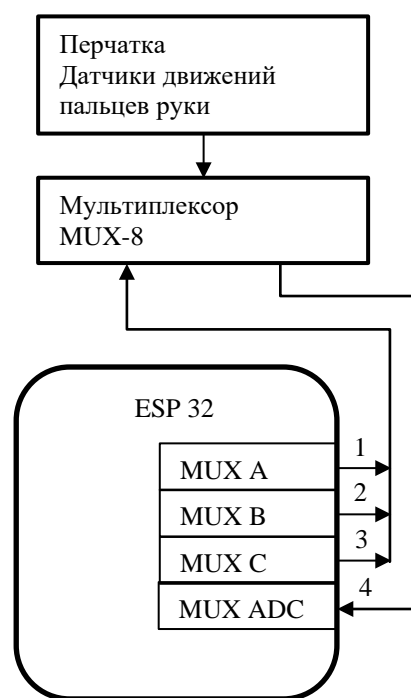


Рис. 1. Упрощенная схема управления перчаткой

Мультиплексор по сигналам с микроконтроллера ESP 32 подключает канал каждого пальца к одному общему каналу на выходе и передает в этот канал уровни напряжений, соответствующие изгибу каждого пальца. Подключение происходит последовательно по номерам пальцев от 0 до 4. Номер подключаемого канала в двоичном представлении поступает на MUX-8 с микроконтроллера ESP32 по трем проводам с выходов MUX-A, MUX-B, MUX-C. Сформированный таким

образом аналоговый сигнал поступает в микроконтроллер ESP 32 на вход АЦП (MAX ADC на рис.1) для дальнейшего его преобразования для передачи по WiFi на управляемый объект.

Описанная картина формирования аналогового сигнала представлена на рис. 2.

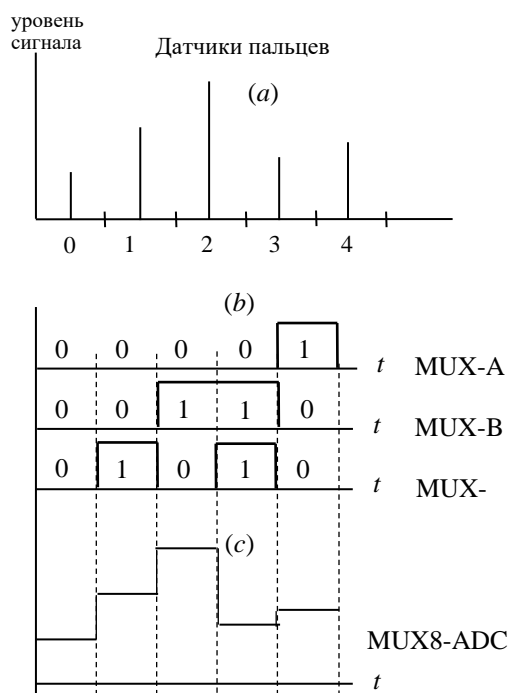


Рис. 2. Формирование аналогового сигнала перчатки

Рис. 2а показывает уровни сигналов, соответствующие изгибу каждого пальца в рассматриваемый момент времени, которые поступают на мультиплексор MUX-8 по каналам передачи, связывающим каждый палец с мультиплексором. Рис. 2b представляет последовательно во времени сигналы управления, определяющие в двоичном исчислении номера каналов, с которых сигналы поступают на выход мультиплексора. И, наконец, рис. 2с показывает сформированный на выходе MUX-8 сигнал, поступающий на вход АЦП микроконтроллера ESP32, обозначенный как MUX8-ADC.

Сигналы управления, поступающие в одном жгуте с сигналом на выходе мультиплексора, могут исказить этот сигнал посредством наводок помех через индуктивные и емкостные связи между проводами. Как следует из рис. 2b и описанной процедуры управления, сигналы в каждом проводе являются периодическими последовательностями прямоугольных импульсов. При этом (рис. 1 и 2) в проводе 1 (MUX-A) имеет место периодическая последовательность одиночных импульсов, а в проводах 2 (MUX-B) и 3 (MUX-C) имеет место последовательность пар импульсов. Сигнал с выхода мультиплексора поступает на АЦП микроконтроллера (MUX8-ADC) по проводу номер 4.

### III. ОЦЕНКА ТЕКУЩИХ И ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСКАЕМЫХ ПОМЕХ

Общей характеристикой мешающих сигналов является то, что все они представляют собой прямоугольные импульсы. В то же время формулы,

определяющие уровни наведенной емкостной или индуктивной помехи обычно используются, рассматривая гармоническую (синусоидальную) помеху. Поскольку управляющие сигналы являются периодическими последовательностями импульсов, их можно представить суммой гармонических колебаний, используя ряд Фурье.

Ряд Фурье для бесконечной последовательности одиночных импульсов  $v(t)$  с амплитудой  $V$ , длительностью  $\tau$  и периодом  $T$  имеет вид [1]:

$$v(t) = V \cdot \left( \frac{\tau}{T} \right) + \frac{2V}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin(k\pi \frac{\tau}{T}) \cos(\frac{2\pi k}{T} t) \quad (1)$$

Постоянная составляющая, представленная первым слагаемым выражения (1), не создает помех в соседних проводах, поэтому ее можно исключить из дальнейшего рассмотрения. В рассматриваемых импульсных последовательностях  $T = 5\tau$ . Следовательно, вклад постоянной составляющей в значение  $v(t)$  составляет  $\tau/T=0,2$ , а переменной составляющей 0,8.

Будем ориентироваться на значение переменной составляющей импульса при  $t=0$ . Кроме того ограничим число рассматриваемых гармоник  $k = K$ . Тогда для  $\tau/T=1/5$  уровень сигнала, создающего емкостную и индуктивную помехи в соседнем проводе жгута, как следует из (1), составит

$$v(0) = \frac{2V}{\pi} \sum_{k=1}^K \frac{1}{k} \sin(k\pi/5) \quad (2)$$

Слагаемые этого выражения представляют амплитуды гармоник, суммирование которых происходит с учетом фазового сдвига в точке  $t=0$ . Используя (2), можно найти число гармоник  $K$ , которое обеспечивает воспроизведение значения переменной составляющей (т.е.  $v(0)/V=0,8$ ) с требуемой погрешностью. Ряд (2) сходится достаточно медленно. Так при  $K = 9$  отклонение отношения  $|v(0)/V|$  от 0,8 составляет 11,75%, при  $K = 19$  оно равно 6%, а при  $K=29$  его значение составляет 4%. Тем не менее, всегда можно найти значение  $K$ , обеспечивающее требуемую точность получения значения  $v(0)$ .

Если  $V_j$  ( $j=1, 2, 3$ ) амплитуда импульса, приложенного к  $j$ -ому проводу, то, принимая во внимание, что в нашем случае амплитуды импульсов управляющих сигналов, приложенных к MUX-8, одинаковые, можно положить  $V_1=V_2=V_3=V$ . Обозначим  $V_k$  значение напряжения  $k$ -ой гармоники. Из (2) следует, что для периодической последовательности одиночных импульсов при  $t=0$

$$V_k = \frac{2V}{k\pi} \sin(k\pi \frac{\tau}{T}), \quad (3)$$

Значение паразитной емкости связи  $C_{j4}$  между  $j$ -ым проводником в жгуте и проводником номер 4, несущим аналоговый сигнал для передачи его по WiFi, можно оценить, используя выражение [2]:

$$C_{j4} = 2\pi\epsilon\epsilon_0 l / \text{arch}[(d^2 - r_j^2 - r_4^2) / 2r_j r_4] \quad (4)$$

где  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м электрическая постоянная,  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды между проводниками,  $r_j$  и  $r_4$  – радиусы соответственно  $j$ -го и четвертого проводников,  $d$  – расстояние между центрами проводников, а  $l$  – длина проводников, м,

Поскольку проводник, соединяющий земли датчиков и микроконтроллеров, находится в одном жгуте с проводниками, несущими управляющие и информационные сигналы, значение емкости  $C_{4G}$  между проводником номер 4 и проводником заземления можно получить из (4). Для этого достаточно в (4) заменить  $r_j$  на радиус проводника заземления и взять в качестве  $d$  расстояние между центрами проводника 4 и проводника заземления.

Пусть  $R$  нагрузка линии проводника 4 (входное сопротивление ESP 32, вход MUX-8 ADC). Тогда напряжение, наведенное на нагрузку линии 4  $k$ -ой

гармоникой сигнала линии проводника  $j$  вследствие емкостной связи между линиями

$$V_{Cjk} = \frac{k\omega RC_{j4}}{\sqrt{1 + (k\omega)^2 R^2 (C_{j4} + C_{4G})^2}} V_k, \quad (5)$$

где  $\omega = 2\pi/T$

Напряжение помехи, создаваемое проводом  $j$  в проводе 4 посредством емкостной связи

$$V_{Cj} = \sum_{k=1}^K V_{Cjk} \quad (6)$$

При  $j=1$  это будет помеха, обусловленная емкостной связью провода 4 с проводом 1.

Рассмотрим теперь последовательности пар импульсов, которые имеют место в проводах 2 и 3. В общем виде периодическая последовательность пар импульсов представлена на рис. 3.

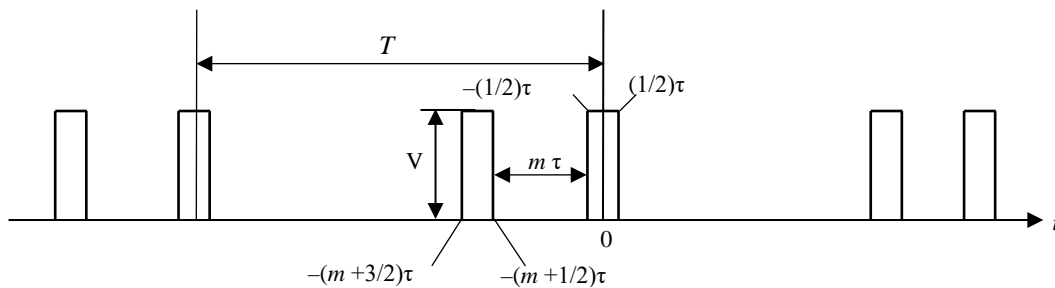


Рис. 3. Периодическая последовательность пар импульсов

Рассмотрим теперь последовательности пар импульсов, которые имеют место в проводах 2 и 3. В общем виде периодическая последовательность пар импульсов представлена на рис. 3.

На рис. 3  $T$  обозначает период последовательности пар импульсов, а  $m$  – число тактов, каждый протяженностью в длительность импульса, разделяющих пару. Ситуация, когда  $m = 0$ , имеет место в проводе 2, ситуация, когда  $m = 1$ , соответствует проводу 3 (рис. 2). Учитывая связь преобразований Фурье исходной функции и функции, сдвинутой во времени на  $(m + 1)\tau$ , найдем связь коэффициентов ряда Фурье рассматриваемой последовательности и периодической последовательности одиночных импульсов ( $j = 2, 3$  номер провода)

$$A_{kj} = V_k (1 + e^{-i2\pi k(m+1)\frac{\tau}{T}}) \quad (7)$$

Здесь  $i = \sqrt{-1}$ ,  $A_{kj}$  коэффициенты ряда Фурье последовательности, представленной на рис. 3,  $V_k$  коэффициенты ряда Фурье рассмотренной ранее последовательности одиночных прямоугольных импульсов в первом проводе ( $j=1$ ).

Амплитуда  $k$ -ой гармоники рассматриваемой последовательности импульсов есть модуль функции (7):

$$|A_{kj}| = 2 |V_k \cos[2\pi k(m+1)\tau/T]| \quad (8),$$

а ее фаза

$$\varphi_{kj} = -\arctg\left\{ \frac{\sin[2k\pi(m+1)\tau/T]}{1 + \cos[2k\pi(m+1)\tau/T]} \right\} \quad (9)$$

Или, учитывая (3) и то, что  $\tau/T = 1/5$ , для провода 2, где  $m = 0$ , из (8) и (9) получим

$$|A_{k2}| = \frac{2V}{k} |\sin(2k\pi/5)|$$

$$\varphi_{k2} = -\arctg\left[ \frac{\sin(2k\pi/5)}{1 + \cos(2k\pi/5)} \right]$$

Для провода 3, где  $m = 1$

$$|A_{k3}| = \frac{2V}{k} |\sin(4k\pi/5)|$$

$$\varphi_{k3} = -\arctg\left[ \frac{\sin(2k\pi/5)}{1 + \cos(2k\pi/5)} \right]$$

Значение напряжения  $k$ -ой гармоники в  $j$ -ом проводе в рассматриваемый момент времени ( $t = 0$ ) для последовательности пар импульсов ( $j = 2, 3$ ):

$$V_k = |A_{kj}| \cos(\varphi_{kj})$$

Теперь, используя (5) и (6) для  $j = 2, 3$ , найдем  $V_{C2}$  и  $V_{C3}$  и далее полный уровень помехи, обусловленный емкостными связями между проводами в жгуте

$$V_C = \sqrt{\sum_{j=1}^3 V_{Cj}^2} \quad (10)$$

Уровень помехи, вызванный связями по магнитному полю можно оценить следующим образом. Взаимная индукция между проводами 4 и  $j$  [3,4]

$$M_{j4} = \frac{\mu l}{2\pi} \left[ \ln\left(\frac{2l}{d}\right) - 1 \right]$$

Здесь  $\mu$  магнитная проницаемость среды, окружающей провода, Гн/м. Остальные параметры как в (4).

Обозначим резистивную нагрузку линий, создающих помехи ( $j = 1, 2, 3$ )  $R_1$ . Эта нагрузка составляет единицы и десятки тысяч ом, а индуктивное сопротивление проводов на частотах, используемых в костюме телеприсутствия, менее одного ома. Поэтому можно считать, что ток, создаваемый  $k$ -ой гармоникой  $j$ -го мешающего сигнала и формирующий окружающее магнитное поле, составляет

$$I_{jk} = V_k / R_1$$

Напряжение, наведенное  $k$ -ой гармоникой  $j$ -го мешающего сигнала в цепи  $R_1 - R$

$$V_{Ljk}^* = k\omega M_{j4} I_{jk}$$

Наконец, напряжение, создаваемое  $k$ -ой гармоникой  $j$ -го мешающего сигнала на полезной нагрузке  $R$

$$V_{Ljk} = \frac{R}{R_1 + R} \cdot V_{Ljk}^*$$

Напряжение, создаваемое на нагрузке  $R$   $j$ -ым мешающим сигналом

$$V_{Lj} = \sum_{k=1}^K V_{Ljk}$$

Полный уровень помехи, обусловленный индуктивными связями между проводами в жгуте

$$V_L = \sqrt{\sum_{j=1}^3 V_{Lj}^2} \quad (11)$$

Окончательное среднеквадратическое значение напряжения помехи с учетом (10), (11) и теплового шума на нагрузке провода с полезным сигналом составит:

$$V_n = \sqrt{V_C^2 + V_L^2 + 10^{P_{ш}/10} R},$$

где  $P_{ш}$  – мощность теплового шума. Мощность теплового шума  $P_{ш}$  не зависит от сопротивления нагрузки. Пусть полоса пропускания рассматриваемой линии составляет  $B$ , Гц. Тогда для температуры 290К мощность шума составит

$$P_{ш} = -204 + 10 \lg(B), \text{ дБВт}$$

Оценку степени опасности помехи производим сравнением ее расчетных значений с предельно допустимым уровнем. В качестве предельно допустимого уровня выбран интервал квантования сигналов, передаваемых на управляемый объект. Для интервала передаваемых сигналов  $V$  Вольт при  $N$  уровнях квантования интервал квантования составляет

$$\Delta V = V/N \text{ (Вольт)}$$

Помеха, превышающая это значение ( $V_n > \Delta V$ ), неизбежно приведет к искажению передаваемого сигнала, которое может привести к неправильным действиям удаленного объекта.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена процедура анализа и оценки уровня помех, создаваемых электрическими и магнитными полями проводов с сигналами управления процессом формирования информационного сигнала, и проводом, несущим информационный сигнал в жгуте перчатки костюма телеприсутствия. Поскольку в жгуте провода можно считать параллельными, объем вычислений можно уменьшить и пренебречь вкладом, внесенным в помеху магнитным полем токов проводов, несущих мешающие сигналы. Выполненный анализ не дает полного представления о качестве передаваемого сигнала, поскольку рассматривает только влияние на сигнал наводок, создаваемых соседними проводами жгута, и не учитывает других искажений сигнала, возникающих при его формировании. Тем не менее, этот анализ дает возможность оценить качество связей, обеспечивающих обмен сигналами между микроконтроллером и мультиплексором перчатки костюма телеприсутствия, и при неудовлетворительной оценке определить меры, необходимые для повышения качества этих связей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов – 4-е изд. перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
- [2] Clayton R. Paul Analysis of Multiconductor Transmission Lines. Wiley-IEEE Press. Second Edition, 2008. P 800.
- [3] Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 3. 4-е изд. / К.С. Демирчян, Л.П. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. СПб.: Питер, 2003. 377с.
- [4] Ott W. Henry Electromagnetic Compatibility Engineering. Wiley & Sons, Inc., 2009. P 862.