



народной научно-технической конференции / под ред. С.А. Прохорова. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2016. - С. 49-51.

А.А. Виноградов, И.В. Гринь, Р.А. Ершов, О.А. Морозов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ПОДХОДА МИНИМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИИ КЕЙПОНА В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ВЗАИМНОЙ ВРЕМЕННОЙ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛОВ С OFDM-МОДУЛЯЦИЕЙ

(Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского)

Высокую актуальность в настоящее время приобретают задачи позиционирования излучающих объектов методами пассивной пеленгации в реальном масштабе времени. Одним из наиболее распространенных методов пассивной пеленгации является разностно-дальномерный метод, при реализации которого возникает задача оценки взаимных временных задержек между искаженными копиями излученного сигнала, распространяющимися по разным каналам в условиях низкого отношения сигнал/шум.

В современных цифровых спутниковых системах связи активно используется технология ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM), применение которой позволяет с высокой эффективностью использовать всю ширину спектральной полосы. Сигнал с OFDM-модуляцией формируется на основе следующего выражения [1]:

$$S[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} Z_k \exp[2j\pi nk / N] \quad (1)$$

где N – количество поднесущих, n – индекс временного отсчета, k – индекс поднесущей, Z_k – комплексный элемент сигнального созвездия, соответствующий передаваемой битовой последовательности.

Традиционные методы оценки взаимной временной задержки, основанные на вычислении взаимной корреляционной функции или взаимной функции неопределенности, не дают состоятельной оценки при обработке широкополосных сигналов вследствие существенного влияния смещения и масштабирования спектров сигналов, вызванного эффектом Доплера [2, 3].

Для определения взаимной временной задержки OFDM-сигналов предлагается метод, основанный на выделении из принимаемых широкополосных сигналов M узкополосных каналов и последующем применении нелинейной цифровой фильтрации к сигналам в этих каналах для выделения скачков фазы. Общая схема метода представлена на рис. 1.

На вход алгоритма поступают сигналы $s(t)$ и $\tilde{s}(t)$, причем $\tilde{s}(t)$ является искаженной и задержанной копией сигнала $s(t)$. На первом этапе происходит выделение узкополосных каналов при помощи заранее синтезированного набо-



ра линейных полосовых КИХ-фильтров с частотными характеристиками H_i . Ширина и центральная частота каждого канала задаются на начальном этапе работы алгоритма. Как правило, при определении местоположения источника излучения важна работа алгоритма в жестко ограниченных временных рамках, следовательно, представляет интерес минимизация выделяемых узкополосных каналов для сокращения времени работы алгоритма.

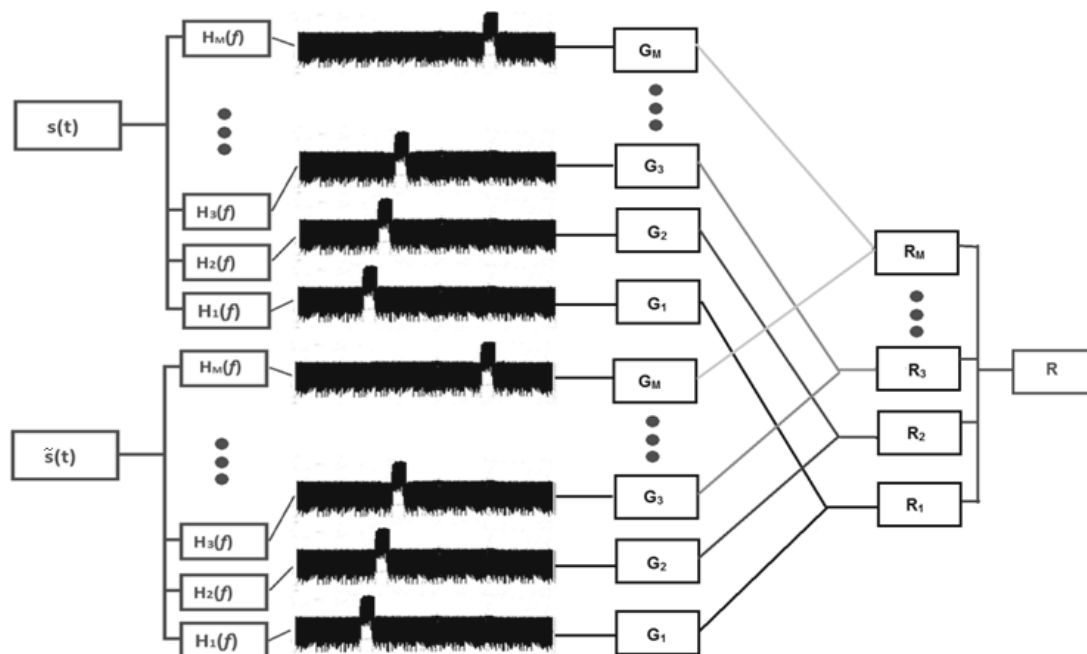


Рис. 1. Блок-схема алгоритма определения взаимной временной задержки OFDM-сигналов

Для двух наборов из полученных M узкополосных сигналов далее применяется алгоритм нелинейной фильтрации для выделения скачков фазы в канале [4]. В качестве фильтра G_i предлагается использовать квадратичный фильтр, основанный на обобщении подхода минимальной дисперсии Кейпона [4,5]. Выходной сигнал данного фильтра определяется следующим образом:

$$y[n] = x^H [n] R_{xx}^\# (f_0) x[n] \quad (2)$$

где $R_{xx}^\#$ - псевдообратная матрица по отношению к автокорреляционной матрице гармонического сигнала с частотой f_0 .

Далее для оценки временной задержки может быть напрямую применен метод максимального правдоподобия, заключающийся в вычислении взаимной корреляционной функции (ВКФ):

$$R_i = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N s_1[j] s_2^*[j+i] \quad (3)$$

где символ «*» обозначает комплексное сопряжение, N – длина сигнала s_1 . Индекс i определяет сдвиг между последовательностями s_1 и s_2 .

Недостаточная выраженность главного максимума взаимной корреляционной функции (3) одной пары выходов фильтра (2) на фоне побочных максимумов (вследствие низкой скорости передачи по сравнению с принимаемым



OFDM-сигналом) не позволяет с необходимой точностью оценивать временную задержку сигналов (рис. 2).

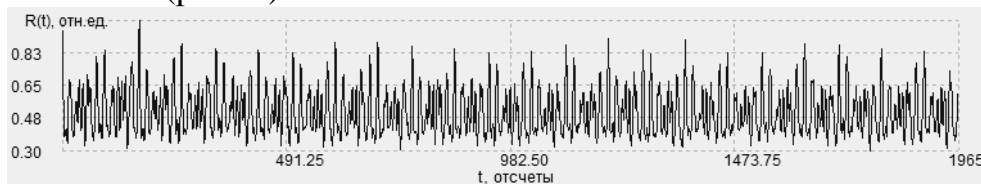


Рис. 2. ВКФ фильтрованных сигналов одного узкополосного канала

Для получения состоятельной оценки временной задержки предлагается алгоритм, основанный на усреднении M взаимных корреляционных функций, полученных на предыдущем этапе [2, 3]:

$$R[n] = \sum_{i=0}^M |R_i[n]| \quad (4)$$

где $R_i[n]$ - n -ый отсчет взаимной корреляционной функции i -ой пары узкополосных сигналов. По положению максимума усредненной ВКФ (4) оценивается взаимная временная задержка опорного и исследуемого сигналов.

На рис. 3-4 представлены главные взаимные корреляционные функции при количестве обрабатываемых узкополосных каналов $M = 5, 20$ соответственно. Моделировались OFDM-сигналы со следующими параметрами: ширина спектральной полосы OFDM-сигнала $B = 400$ МГц, частота дискретизации OFDM-сигнала $F_s = 800$ МГц, ширина спектральной полосы одного канала $B_c = 4$ МГц, длина квадратичного фильтра $L = 4$ отсчета, задержка 10000 отсчетов (0.0125 мс), величина доплеровского сдвига несущей частоты $\Delta F_d = 30$ кГц, отношение сигнал/шум исследуемого сигнала 0 дБ, модуляция поднесущих ФМ-4.

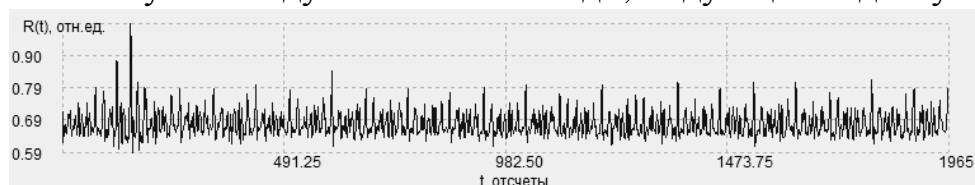


Рис. 3. Усредненная ВКФ, $M = 5$

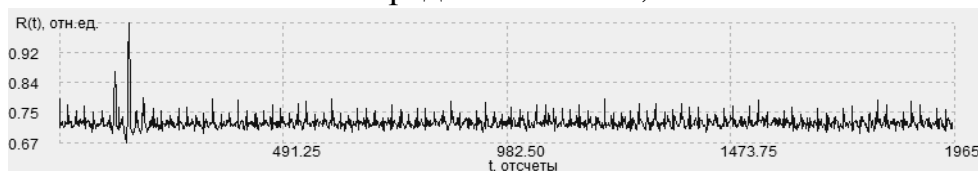


Рис. 4. Усредненная ВКФ, $M = 20$

При усреднении наблюдается значительное улучшение выраженности главного максимума взаимной корреляционной функции (рис. 3-4). При количестве обрабатываемых каналов $M = 20$ ВКФ имеет ярко выраженный главный максимум, соответствующий взаимной временной задержке между сигналами.

Проведено исследование зависимости вероятности правильного определения временной задержки OFDM-сигналов на основе предложенного алгоритма от величины отношения сигнал/шум (ОСШ). Результаты исследования представлены на рис. 5.

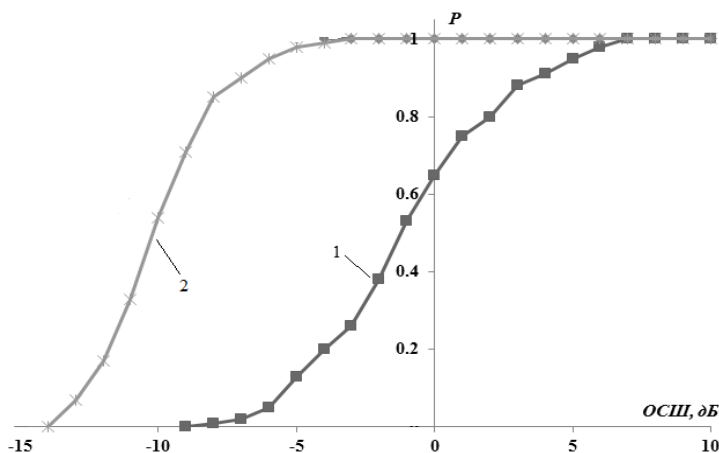


Рис. 5. Зависимость правильного определения временной задержки от величины ОСШ. 1 – Алгоритм, основанный на вычислении взаимной функции неопределённости; 2 – Алгоритм на основе квадратичной фильтрации

Таким образом, описанный в работе алгоритм оценки взаимной временной задержки сигналов является устойчивым к шумам вплоть до ОСШ, равного -13 дБ. Предложенный подход может быть положен в основу алгоритма определения местоположения источника радиоизлучения разностно-дальномерным методом.

Литература

1. Бакулин, М.Г. Технология OFDM. Учебное пособие для вузов. / М.Г. Бакулин, В.Б. Крейнделин, А.М. Шлома, А.П. Шумов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 360 с.
2. Ершов, Р.А. Оценка взаимной временной задержки сигналов с псевдослучайной скачкообразной перестройкой частоты / Р.А. Ершов, О.А. Морозов, В.Р. Фидельман // Известия вузов. Радиофизика, 2015. Т.58, № 2. С.157.
3. Ершов, Р.А. Вычислительно-эффективный алгоритм оценки временной задержки широкополосных сигналов / Р.А. Ершов, О.А. Морозов, В.Р. Фидельман // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014. Т.16, №4(2). С.384.
4. Логинов, А.А. Алгоритм цифровой предварительной обработки сигналов с квадратурной фазовой модуляцией в задаче определения взаимной временной задержки / А.А. Логинов, О.А. Морозов, С.Л. Хмелев // Известия вузов. Радиофизика, 2009. Т.52, № 5-6. С.503.
5. Виноградов, А.А. Метод оценки взаимной временной задержки сигналов с OFDM-модуляцией на основе модифицированного подхода минимальной дисперсии Кейпона / А.А. Виноградов, Р.А. Ершов // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. 2016. – С.319.